

Universidade Federal de Alagoas  
Instituto de Ciências Atmosféricas  
Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Marcones de Oliveira Silva

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) NA CIDADE DE MACEIÓ/AL  
UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM

Maceió-AL

2018

Marcones de Oliveira Silva

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) NA CIDADE DE MACEIÓ/AL  
UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Atmosféricas – ICAT da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de Concentração: Geociências

Orientador: Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior

Maceió-AL

2018

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

S586a Silva, Marcones de Oliveira.

Avaliação de qualidade do ar (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) na cidade de Maceió/AL utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM / Marcones de Oliveira Silva. – 2018.

121f. : il.

Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.

Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 103-107.

Apêndices: f. 108-121.

1. Ar – Qualidade – Maceió (AL). 2. Modelo WRF/CHEM. 3. Inventário. 4. Topografia. 4. Uso do solo. I. Título

CDU: 551.588.74 (813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

### CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-153.

“AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) NA CIDADE DE  
MACEIÓ/AL, UTILIZANDO O MODELO ATMOSFÉRICO WRF/CHEM.”

*Marcones de Oliveira Silva*

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior  
(Orientador)

Prof. Dr. Marcos Antonio Lima Moura  
(Membro Interno)

Prof.ª Dra. Maria de Fatima Andrade  
(Membro Externo- USP)

Abril /2018

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e em especial a minha mãe Maria Cícera de Oliveira Silva e ao meu pai Diomar Basílio da Silva. Ao professor Rosiberto Salustiano da Silva Júnior pelas valiosas orientações no decorrer do curso de mestrado e a todos os membros do Laboratório de Modelagem atmosférica e Instrumentação Meteorológica do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Silva, M. O. **Avaliação da qualidade do ar (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) na cidade de Maceió/AL utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM**. 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do ar na cidade de Maceió-AL utilizando o modelo numérico de mesoescala WRF/CHEM (Weather Research and forecasting/Chemistry) durante o período de 23 a 25 de abril de 2011. O WRF/CHEM foi configurado para realizar quatro tipos de simulações: Default - simulação com a topografia e uso do solo padrões do modelo; Topo - simulação com a topografia atualizada e uso do solo padrão; IGBP - simulação com a topografia padrão e uso do solo atualizado e Topo\_IGBP - simulação com a atualização da topografia e uso do solo. O inventário de emissões veiculares necessário para servir como dado de entrada no modelo foi construído de acordo com a metodologia proposta pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) onde se calculou as emissões totais em toneladas anuais de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos não metano (NMHC) e material particulado (MP). O modelo WRF/CHEM foi executado com duas grades aninhadas com espaçamento de grade de 5 e 1 km. Os resultados obtidos mostraram que a resolução de 1 km obteve resultados melhores, em relação às observações, para as simulações de temperatura, umidade relativa e concentrações de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) do que os resultados obtidos pelas simulações utilizando a grade de 5 km, porém a variabilidade horária foi melhor representada pela resolução de 5 km. A simulação Topo foi a que apresentou melhor acurácia das simulações nas duas resoluções adotadas mostrando que a atualização da topografia é mais eficiente do que a atualização do uso do solo.

Palavras-Chave: WRF/CHEM; inventário; topografia; uso do solo; resolução.

## ABSTRACT

Silva, M. O. **Evaluation of the air quality (NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) of Maceió/AL using the atmospheric model WRF/CHEM.** 2018. 121 p. Dissertation (Master in Meteorology) – Federal University of Alagoas, Maceió, 2018.

This work aims to evaluate the air quality in the city of Maceió-AL using the numerical model of the WRF/CHEM (Weather Research and forecasting / Chemistry) during the period from April 23 to 25, 2011. The WRF/CHEM was configured to perform four types of simulations: Default - simulation with topography and land use patterns of the model; Topo - simulation with updated topography and standard soil use; IGBP - simulation with the standard topography and updated soil use and Topo\_IGBP - simulation with updating topography and land use. The vehicle emissions inventory required to serve as input data in the model was constructed according to the methodology proposed by the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB) where the total emissions in annual tons of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), non-methane hydrocarbons (NMHC) and particulate matter (MP). The WRF/CHEM model was run with two nested grids with grid spacing of 5 and 1 km. The results obtained showed that the resolution of 1 km obtained better results, relative to the observations, for the simulations of temperature, relative humidity and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations than the results obtained by the simulations using the 5 km grid, the hourly variability was best represented by the resolution of 5 km. The Topo simulation was the one that presented better accuracy of the simulations in the two adopted resolutions showing that the updating of the topography is more efficient than the update of the land use.

Keywords: WRF/CHEM; inventory; topography; land use; resolution.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	V
<b>ABSTRACT</b>	VI
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	X
<b>LISTA DE TABELAS</b>	XIII
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	XVI
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	19
1.1 Poluição atmosférica. . . . .	19
1.2 Camada limite planetária (CLP). . . . .	22
1.3 Brisa terrestre e marítima. . . . .	23
1.4 Formação do ozônio troposférico. . . . .	24
1.4.1 Formação do radical hidroxila (OH). . . . .	24
1.4.2 Ciclo básico do ozônio (O <sub>3</sub> ), monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ). . . . .	25
1.4.3 Oxidação do monóxido de carbono (CO). . . . .	26
1.5 Estudos sobre modelagem atmosférica utilizando o WRF/CHEM. . . . .	27
1.6 Objetivos. . . . .	32
1.6.1 Objetivo Geral. . . . .	32
1.6.2 Objetivos específicos. . . . .	32
<b>2. METODOLOGIA</b>	33
2.1 Área de estudo. . . . .	33
2.2 Modelo Atmosférico WRF/CHEM (Weather Research and forecasting/Chemistry). . . . .	34
2.2.1 Configurações do Modelo. . . . .	36
2.2.1.1 Domínios de simulação. . . . .	36
2.2.1.2 Configuração física e química. . . . .	37
2.2.1.3 Inventário de emissão. . . . .	38
2.2.1.3.1 Emissões de Escapamento. . . . .	39
2.2.1.3.2 – Emissões de poluentes pelos veículos automotores. . . . .	45

2.2.2	Local de medição de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ).	47
2.2.3	Validação das simulações.	47
2.2.3.1	Concentrações de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ).	47
2.2.3.1.1	Princípio de funcionamento do Analisador NITROGEN OXIDE ANALISER - Modelo 200A.	48
2.2.3.2	Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.	49
2.2.4	Distribuição espacial e temporal das emissões no WRF/CHEM.	49
2.2.5	Fator de correção de emissão.	51
2.2.6	Atualização da topografia e uso do solo.	52
2.2.7	Descrição das simulações e período de estudo.	54
2.2.8	Condição inicial para a química do modelo.	54
2.2.9	Análise estatística.	54
2.2.9.1	Média ( $\bar{M}$ ).	55
2.2.9.2	Desvio Padrão ( $\sigma$ ).	55
2.2.9.3	Erro Médio (EM) ou Viés.	55
2.2.9.4	Coefficiente de Correlação (r).	55
2.2.9.5	Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ).	56
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>58</b>
3.1	Descrição das condições meteorológicas.	58
3.2	Resolução de 5 km.	61
3.2.1	Variáveis meteorológicas.	61
3.2.1.1	Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento.	61
3.2.1.2	Altura da camada limite planetária (CLP) e radiação solar global.	66
3.2.1.3	Análise estatística.	68
3.2.2	Variáveis químicas.	72
3.2.2.1	Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ).	72
3.2.2.1.1	Análise estatística.	75

3.2.2.2 Ozônio (O <sub>3</sub> ) . . . . .	77
3.2.2.3 Monóxido de carbono (CO) . . . . .	78
3.3 Resolução de 1 km . . . . .	79
3.3.1 Variáveis meteorológicas . . . . .	79
3.3.1.1 Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento . . . . .	79
3.3.1.2 Altura da camada limite planetária (CLP) e radiação solar global. . .	83
3.3.1.3 Análise estatística. . . . .	84
3.3.2 Variáveis químicas. . . . .	88
3.3.2.1 Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ). . . . .	88
3.3.2.1.1 Análise estatística. . . . .	90
3.3.2.2 Ozônio (O <sub>3</sub> ) . . . . .	92
3.3.2.3 Monóxido de Carbono (CO). . . . .	93
3.4 Análise estatística geral. . . . .	94
3.5 Distribuição espacial de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ). . . . .	96
3.6 Avaliação da qualidade do ar na cidade de Maceió-AL. . . . .	99
<b>4. CONCLUSÕES</b>	101
<b>5 . TRABALHOS FUTUROS</b>	102
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	103
<b>APÊNDICE A</b>	108
<b>APÊNDICE B</b>	109
<b>APÊNDICE C</b>	116
<b>APÊNDICE D</b>	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Número de veículos emplacados no Brasil, por ano de fabricação, durante o período de 2002 a 2016. . . . .	20
Figura 1.2 – Número de veículos emplacados em Alagoas, por ano de fabricação, durante o período de 2002 a 2016. . . . .	20
Figura 1.3 – Camada Limite Planetária (CLP) e suas diversas partes de acordo com a hora do dia - A é a camada estável, B é a camada de ar residual, C é a camada instável e D é camada de ar da atmosfera livre que pertence a CLP. . . . .	23
Figura 1.4 – Brisa marítima e terrestre - (a) brisa marítima (vento em direção ao continente) e (b) brisa terrestre (vento em direção ao oceano). . . . .	24
Figura 2.1 - Localização da área de estudo. . . . .	33
Figura 2.2 – Variação anual da população de Maceió-AL durante os anos de 2011 a 2017. . . . .	34
Figura 2.3 - Aninhamento de grades no WRF/CHEM. . . . .	36
Figura 2.4 - Diagrama esquemático com as etapas da metodologia proposta. . . . .	40
Figura 2.5 - Percentual da distribuição de veículos por idade no período de -2002 até 2016 para Maceió (azul) e Alagoas (vermelho). . . . .	45
Figura 2.6 – Percentual de emissão de poluentes por categoria de veículos. . . . .	46
Figura 2.7 – Cidade de Maceió-AL com suas principais vias de tráfego e local de medição. . . . .	47
Figura 2.8 - Analisador NITROGEN OXIDE ANALISER – Modelo 200A - Utilizado para medir concentrações de NO e NO <sub>x</sub> . . . . .	48
Figura 2.9 - Distribuição espacial dos pontos de emissão . . . . .	50
Figura 2.10 - Perfil temporal das emissões. . . . .	51
Figura 2.11 – Atualizações da topografia e uso do solo - (a) configuração padrão da topografia do WRF/CHEM, (b) topografia atualizada, (c) configuração padrão do uso do solo do WRF/CHEM e (d) uso do solo atualizado. . . . .	53
Figura 3.1 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 23/04/2011 as 12 e 00 UTC. . . . .	58
Figura 3.2 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 24/04/2011 as 12 e 00 UTC. . . . .	59

Figura 3.3 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 25/04/2011 as 12 e 00 UTC. ....	60
Figura 3.4 – Temperatura do ar simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	62
Figura 3.5 – Umidade relativa do ar simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	62
Figura 3.6 – Velocidade do vento simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	63
Figura 3.7 – Variação percentual trimestral da direção do vento no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares gerada pelo programa WASP para o ano de 1999 - A rosa dos ventos está dividida em oito setores de 45°. O intervalo da escala das circunferências é de 5%. ....	64
Figura 3.8 – Variação percentual da direção do vento simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - Rosas dos ventos dividida em quatro setores de 45°. ....	65
Figura 3.9 – Incidência de radiação solar global simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	67
Figura 3.10 – Altura da camada limite planetária simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações realizadas do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	68
Figura 3.11 – Concentração de NO <sub>2</sub> simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	72
Figura 3.12 – Concentração de O <sub>3</sub> simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	78

Figura 3.13 – Concentração de monóxido de carbono simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	79
Figura 3.14 – Temperatura do ar simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	80
Figura 3.15 – Umidade relativa do ar simulada com a resolução de 1 km para as quatro do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	80
Figura 3.16 – Velocidade do vento simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	81
Figura 3.17 – Variação percentual da direção do vento simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - Rosas dos ventos dividida em quatro setores de 45°. ....	82
Figura 3.18 – Incidência de radiação solar global simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de MaceióAL. ....	84
Figura 3.19 – Altura da camada limite planetária simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	84
Figura 3.20 – Concentração de NO <sub>2</sub> simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	88
Figura 3.21 – Concentração de O <sub>3</sub> simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações realizadas do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	93
Figura 3.22 – Concentração de CO simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL. ....	93
Figura 3.23 – Dispersão espacial de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) simulada para as quatro simulações executadas. ....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Padrões de qualidade do ar - MGA - média geométrica anual, MAA - média aritmética anual, ppm - partes por milhão e 1 – não deve ser excedido mais de uma vez durante o ano . . . . .	21
Tabela 2.1 - Propriedades dos domínios considerados. . . . .	37
Tabela 2.2 - Parametrizações físicas e químicas. . . . .	38
Tabela 2.3 - Definição das categorias de veículos em Maceió – AL. . . . .	42
Tabela 2.4 - Distribuição da frota por categoria em 2016 para Maceió – AL. . . . .	43
Tabela 2.5 - Distribuição da frota por categoria e combustível em 2016 para Maceió – AL - (*) Gasolina comercial vendida nos postos de combustíveis. Possui em sua composição etanol anidro (obtido da cana de açúcar e com teor de água próximo de zero), em percentual que varia de 18% a 27% do volume total (CETESB, 2016). . . . .	44
Tabela 2.6 - Total de Emissões em 2016 de CO, NOx, MP e NMHC para a cidade de Maceió – AL em toneladas por ano (t/ano) . . . . .	46
Tabela 2.7 - Identificação das vias de Maceió-AL com base no tráfego de veículos. . . . .	50
Tabela 2.8 – Categorias de uso do solo do WRF/CHEM. . . . .	52
Tabela 2.9 - Equações e indicadores para a análise estatística - “N” representa o número total de dados, $S_i$ os dados simulados e $O_i$ os dados observados. . . . .	57
Tabela 3.1 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para a resolução de 5 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - os $\bar{M}_{obs}$ e $\bar{M}_{sim}$ são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os $\sigma_{obs}$ e $\sigma_{sim}$ são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O $r$ é o coeficiente de correlação, $EM$ é o erro médio e $REM_Q$ é a raiz do erro médio quadrático. . . . .	70
Tabela 3.2 – Classificação das simulações (resolução de 5 km) Default, Topo, IGBP e Topo _ IGBP de acordo com a acurácia dos resultados simulados em relação aos dados observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento . . . . .	71
Tabela 3.3 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ), Ozônio (O <sub>3</sub> ) e Monóxido de carbono (CO) para a resolução de 5 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - $\bar{M}_{obs}$ e $\bar{M}_{sim}$ são as médias dos valores	

observados e simulados, respectivamente. Os $\sigma_{obs}$ e $\sigma_{sim}$ são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O $r$ é o coeficiente de correlação, $EM$ é o erro médio, $REM_Q$ é a raiz do erro médio quadrático, ppb (partes por bilhão) e ppm (partes por milhão) . . . . .	76
Tabela 3.4 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para a resolução de 1 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - $\bar{M}_{obs}$ e $\bar{M}_{sim}$ são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os $\sigma_{obs}$ e $\sigma_{sim}$ são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O $r$ é o coeficiente de correlação, $EM$ é o erro médio e $REM_Q$ é a raiz do erro médio quadrático. . . . .	86
Tabela 3.5 – Classificação das simulações (resolução de 1 km) Default, Topo, IGBP e Topo _IGBP de acordo com a acurácia dos resultados simulados em relação aos dados observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. . . . .	87
Tabela 3.6 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ), Ozônio (O <sub>3</sub> ) e Monóxido de carbono (CO) para a resolução de 1 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - $\bar{M}_{obs}$ e $\bar{M}_{sim}$ são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os $\sigma_{obs}$ e $\sigma_{sim}$ são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O $r$ é o coeficiente de correlação, $EM$ é o erro médio, $REM_Q$ é a raiz do erro médio quadrático, ppb (partes por bilhão) e ppm (partes por milhão). . . . .	91
Tabela 3.7 - Índices estatísticos médios dos dados simulados de temperatura do ar e umidade relativa do ar nas resoluções de 5 e 1 km - $\bar{M}_{obs}$ e $\sigma_{obs}$ são a média e desvio-padrão dos dados observados, respectivamente. $\bar{M}_s$ , $\sigma_{ms}$ , $r_m$ , $MEM$ e $MREM_Q$ são as médias aritméticas das médias, desvios-padrões, coeficientes de correlação, erros médios e raízes dos erros médios quadráticos, respectivamente, dos dados simulados em Default, Topo, IGBP e Topo _IGBP. . . . .	95
Tabela 3.8 - Índices estatísticos médios dos dados simulados das concentrações de NO <sub>2</sub> nas resoluções de 5 e 1 km - $\bar{M}_{obs}$ e $\sigma_{obs}$ são a média e desvio-padrão dos dados observados, respectivamente. $\bar{M}_s$ , $\sigma_{ms}$ , $r_m$ , $MEM$ e $MREM_Q$ são as médias aritméticas das médias, desvios-padrões, coeficientes de correlação, erros médios e raízes dos erros médios quadráticos, respectivamente, dos dados simulados em Default, Topo, IGBP e Topo_IGBP. . . . .	96

Tabela 3.9 – Comparação das concentrações simuladas de NO<sub>2</sub>, CO e O<sub>3</sub> em relação aos padrões primários estabelecidos pela resolução CONAMA (1990) - ppb ( partes por bilhão) e ppm (partes por milhão. . . . . 100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFWA - Air Force Weather Agency

ARW - Advanced Research WRF

CETESB - Companhia ambiental do estado de São Paulo

CLC - Camada Limite Convectiva

CLN - Camada Limite Neutra

CLE - Camada Limite Estável

CLP - Camada Limite Planetária

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CO - Monóxido de carbono

DMSP - Defense Meteorological Satellite Program

EM – Erro médio

FSL - Forecast System Laboratory

FAA - Federal Aviation Administration

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IED - International Environmental Database (IED)

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

HO<sub>2</sub> - Radical hidroperóxido

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> -Peróxido de hidrogênio

HNO<sub>3</sub> - Ácido nítrico

H<sub>2</sub>O – Molécula de água

h<sub>v</sub> – Luz infravermelha

ILN - Intensidade de Luzes Noturnas

MP - Material particulado

MGA - Média geométrica anual

MAA - Média aritmética anual

MM5 - Penn State Mesoscale Model

Mo - molibdênio

MEM – Média aritmética dos erros médios

MREMQ – Média aritmética das raízes dos erros médios quadráticos

NO<sub>x</sub> - Óxidos de nitrogênio

N<sub>2</sub> – Nitrogênio

NO – Monóxido de nitrogênio

NO<sub>2</sub> – Dióxido de nitrogênio

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Center for Environmental Prediction

NMHC - Hidrocarbonetos não metano

OMS - Organização Mundial da Saúde

O – Oxigênio no estado fundamental

OH - Radical hidroxila

O<sub>3</sub> – Ozônio

O<sub>2</sub> - Oxigênio

O(<sup>1</sup>D) – Oxigênio em estágio excitado

OLS - Operational Linescan System (OLS)

ppb - Partes por bilhão

ppm - Partes por milhão

PRONAR - Programa Nacional de Qualidade do Ar

R – Radical Alquila

RO<sub>2</sub> – Radical peróxido de alquila

RO – Radical alcóxi

RMSP - Região Metropolitana de São Paulo

RML - Região Metropolitana de Lima

RADM2 - The second generation Regional Acid Deposition Model

REMQ – Raiz do erro médio quadrático

RENAVAM - Registro Nacional de Veículos Automotores

SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

USGS – United States Geological Survey

WRF/CHEM - Weather Research and forecasting/Chemistry

VOCs – Compostos orgânicos voláteis

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## 1. INTRODUÇÃO

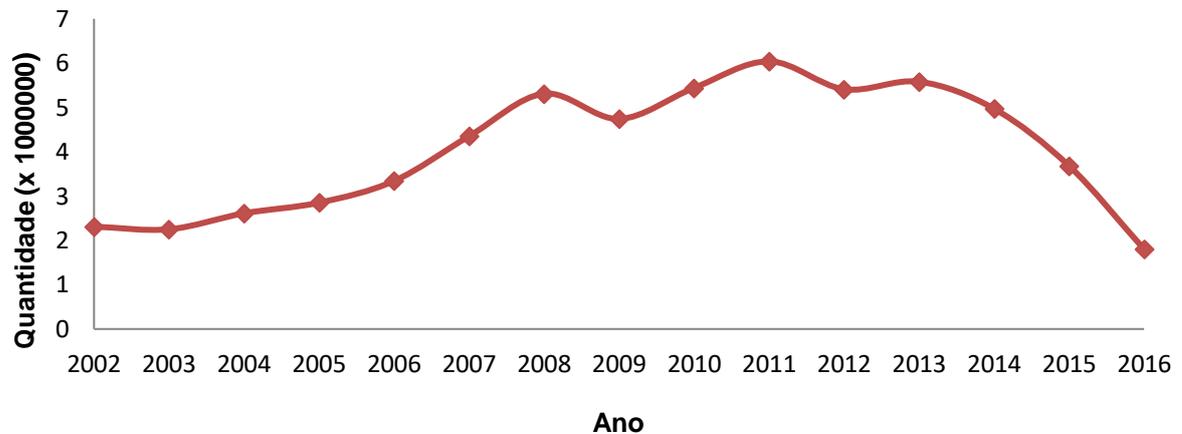
### 1.1 Poluição atmosférica

A poluição do ar é um problema recorrente nas cidades que apresentam grande crescimento populacional e industrial. Na Europa é responsável por até 400 mil mortes prematuras, onde cerca de 97% de sua população urbana está exposta a níveis de ozônio ( $O_3$ ) maiores do que a concentração média de 8 horas ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) recomendada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e cerca de 90% está exposta a níveis de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ) maiores do que a média anual de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  recomendada pela OMS (Kuik et al.,2016). Na região Metropolitana da Cidade do México as médias horárias das concentrações de ozônio ( $O_3$ ) excedem diariamente o padrão mexicano de qualidade do ar de  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tie et al.,2006).

No Brasil, a cidade do Rio de Janeiro, que tem a segunda maior frota veicular do país e uma topografia bastante característica influenciada pela brisa do mar e por montanhas que dificultam a dispersão de poluentes, registrou durante os anos de 2012 e 2013 ultrapassagens do padrão máximo de ozônio ( $O_3$ ) estabelecido pela legislação brasileira vigente de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por hora (Martins et al., 2017). Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que possui a maior frota veicular, 32 dias do ano de 2016 ultrapassaram o padrão estadual de concentração de ozônio estabelecido (média máxima de  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a cada 8 horas) (CETESB, 2017).

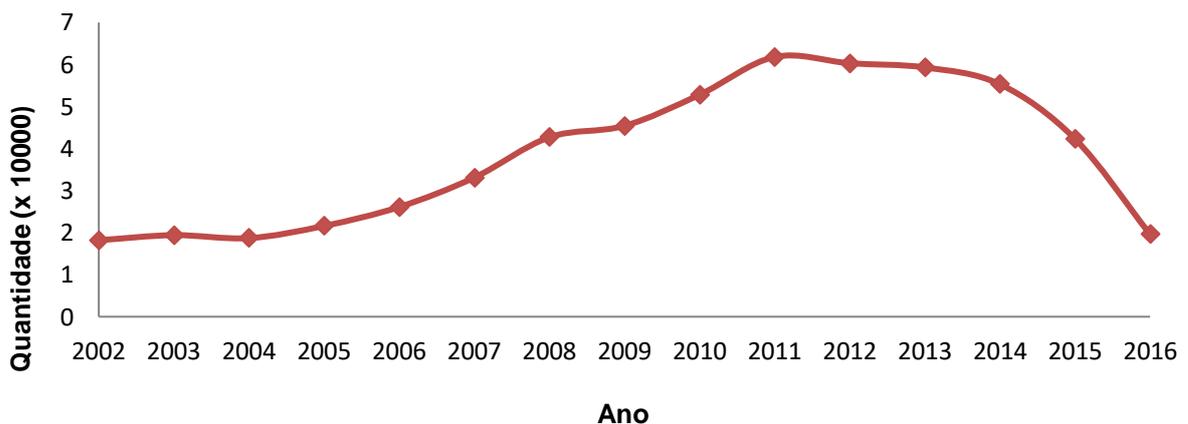
As principais fontes antropogênicas de poluição atmosférica são a combustão, processos industriais, queima de resíduos sólidos e a frota veicular que contribuem com aproximadamente 80% dos poluentes gasosos presentes na atmosfera (Lisboa, 2014). Atualmente, a maior fonte poluidora nas grandes cidades brasileiras é a frota de veículos automotores que cresce anualmente (Figura 1.1). O estado de Alagoas também segue a tendência brasileira de crescimento da frota veicular (Figura 1.2).

**Figura 1.1 – Número de veículos emplacados no Brasil, por ano de fabricação, durante o período de 2002 a 2016.**



Fonte: Autor (2018).

**Figura 1.2 – Número de veículos emplacados em Alagoas, por ano de fabricação, durante o período de 2002 a 2016.**



Fonte: Autor (2018).

Alguns poluentes atmosféricos emitidos diretamente pelos veículos são o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP). Outro poluente que não é emitido diretamente, mas formado através de reações químicas na presença de radiação solar é o ozônio troposférico. É relevante estudar as concentrações desses e outros poluentes e sua distribuição espacial nas cidades porque altas concentrações podem causar danos à saúde das pessoas, em especial, a saúde de idosos e crianças.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) através da resolução nº 5 de 15 de junho de 1989 estabeleceu o Programa Nacional de Qualidade do Ar (PRONAR) como um

dos instrumentos básicos de proteção da saúde e bem-estar das populações tendo em vista um desenvolvimento econômico e social em concordância com a preservação ambiental e aos limites estabelecidos de emissão de poluentes. Esta resolução estabelece os padrões primários e secundários de qualidade do ar. Os padrões primários são limites máximos toleráveis de concentração que se ultrapassados podem causar danos à saúde da população, constituindo-se em metas de curto e médio prazo. Os padrões secundários são limites de concentrações abaixo dos quais se prever o mínimo dano a saúde das pessoas e ao meio ambiente, sendo entendidos como níveis desejáveis de concentração de poluentes e constituindo-se metas de longo prazo.

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990 complementa a resolução nº 5 de 15 de junho de 1989 e estabelece os valores dos padrões primários e secundários (Tabela 1.1) para os poluentes atmosféricos.

**Tabela 1.1 – Padrões de qualidade do ar** - MGA - média geométrica anual, MAA - média aritmética anual, ppm - partes por milhão e 1 – não deve ser excedido mais de uma vez durante o ano.

<b>Poluente</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Padrão Primário (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Padrão Secundário (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
Partículas totais em suspensão	24 horas <sup>1</sup>	240	150
	MGA	80	60
Partículas inaláveis	24 horas <sup>1</sup>	150	150
	MAA	50	50
Fumaça	24 horas <sup>1</sup>	150	100
	MAA	60	40
Dióxido de enxofre	24 horas <sup>1</sup>	365	100
	MAA	80	40
Dióxido de nitrogênio	1 hora <sup>1</sup>	320	190
	MAA	100	100
Monóxido de carbono	1 hora <sup>1</sup>	40.000	40.000
		35 ppm	35 ppm
	8 horas <sup>1</sup>	10.000	10.000
		9 ppm	9 ppm
Ozônio	1 hora <sup>1</sup>	160	160

Fonte: CONAMA (1990).

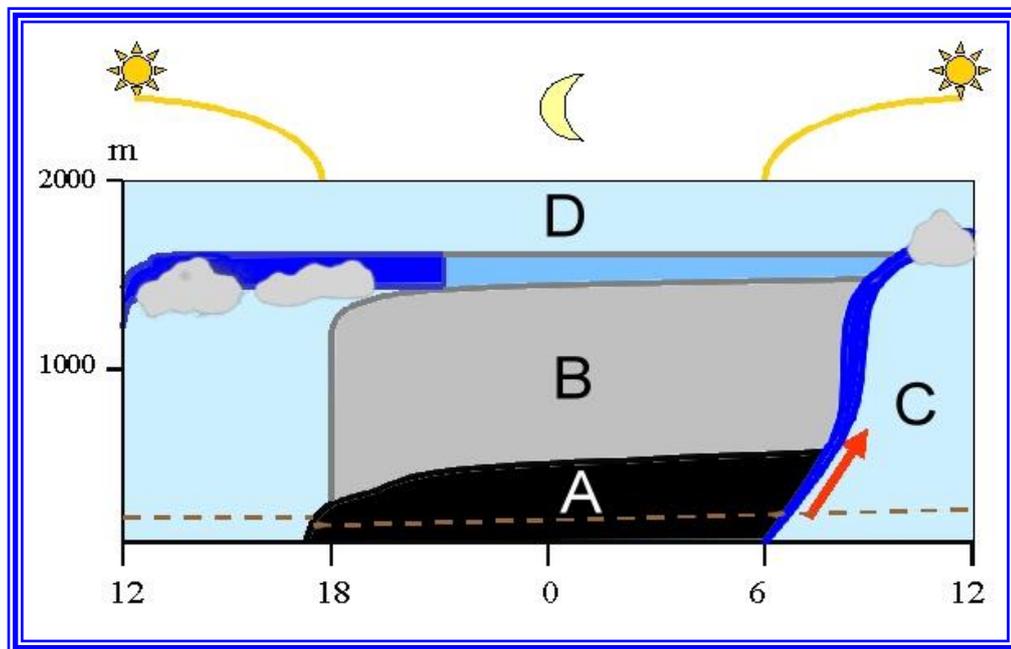
## 1.2 Camada limite planetária (CLP)

A Camada Limite Planetária (CLP) é a região da atmosfera mais próxima da superfície da Terra, onde as partículas suspensas e os gases são dispersos pelo vento e pela turbulência (difusão) podendo atingir centenas de metros a poucos quilômetros dependendo da quantidade de radiação incidente e hora do dia. A CLP é classificada em três tipos dependendo da variação da temperatura potencial ao longo da sua altura:

- Camada Limite Estável (CLE): é gerada pelo resfriamento noturno da superfície terrestre, atingindo uma altura de 100 a 300 metros e onde a temperatura potencial aumenta com a altura;
- Camada Limite Neutra (CLN): ocorre durante o período de transição do dia para a noite, mas a taxa de variação da temperatura potencial é nula. Nesse caso a atmosfera nem inibe nem intensifica a turbulência;
- Camada Limite Convectiva (CLC) ou Instável: é gerada pelo aquecimento diurno da superfície terrestre variando sua altura de 100 a 3000 m. Nesse caso, a temperatura potencial diminui com altura e a turbulência é intensificada.

A estrutura da CLP, apresentada na figura 1.3, mostra que em D as massas de ar da atmosfera livre pertencem a CLP ocorrendo algumas alterações durante o dia (da esquerda para a direita). Entre 12 e 18 horas o ar é misturado (azul claro) em seguida, depois do pôr do sol, forma-se uma camada noturna estável (A), onde o ar residual permanece acima (B). A linha pontilhada mostra que o ar da superfície não pode ir com facilidade para altitudes mais elevadas durante a noite porque não tem energia para efetuar esse movimento. Essa energia volta com a incidência da radiação solar fazendo com que o solo aqueça e o ar começa sua ascensão (seta vermelha). A camada proveniente da noite é quebrada e uma zona de mistura cresce do solo até o topo da camada limite (azul escuro) e deixa o ar bem misturado durante o dia (C).

**Figura 1.3 – Camada Limite Planetária (CLP) e suas diversas partes de acordo com a hora do dia - A é a camada estável, B é a camada de ar residual, C é a camada instável e D é camada de ar da atmosfera livre que pertence a CLP.**



Fonte: Google Imagens<sup>1</sup>.

### 1.3 Brisa terrestre e marítima

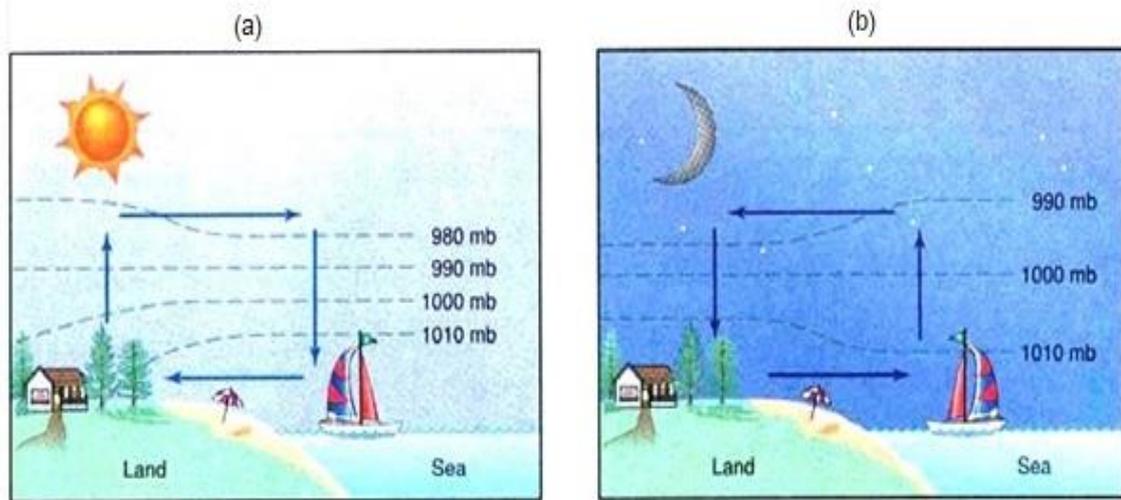
Em regiões costeiras, a brisa é um fenômeno importante e amplamente estudado. A brisa, durante o período diurno, pode amenizar as altas temperaturas nas áreas próximas ao litoral bem como transportar umidade para o interior do continente. Também tem papel importante na dispersão de poluentes nas grandes cidades podendo até influenciar no regime de precipitação (Souza, 2016).

Durante o dia, o maior aquecimento do continente em relação ao oceano gera uma gradiente de pressão que acelera o vento do oceano para o continente dando origem a brisa marítima. Durante a noite ocorre o contrário, ou seja, o maior resfriamento do continente em relação ao oceano acelera o vento em direção ao oceano dando origem à brisa terrestre. A figura 1.4 exemplifica os dois tipos de brisa.

1 – Disponível em:

<[https://www.google.com.br/search?hl=ptBR&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=651&ei=OLavWqHBsKYwgSSv5TIBQ&q=camada+limite+planetaria&oq=camada+limite+planetaria&gs\\_l=img.3..1159.7058.0.7420.26.13.1.12.12.0.166.1559.0j11.11.0...0...1ac.1.64.img..2.19.1589...0j0i30k1j0i24k1.0.p02jHZ6izsY#imgrc=dBV3hEBIWGAaIM](https://www.google.com.br/search?hl=ptBR&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=651&ei=OLavWqHBsKYwgSSv5TIBQ&q=camada+limite+planetaria&oq=camada+limite+planetaria&gs_l=img.3..1159.7058.0.7420.26.13.1.12.12.0.166.1559.0j11.11.0...0...1ac.1.64.img..2.19.1589...0j0i30k1j0i24k1.0.p02jHZ6izsY#imgrc=dBV3hEBIWGAaIM;)> Acesso em março de 2018.

**Figura 1.4 – Brisa marítima e terrestre** - (a) brisa marítima (vento em direção ao continente) e (b) brisa terrestre (vento em direção ao oceano).



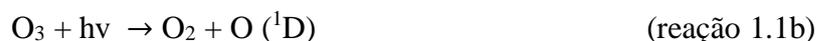
Fonte: Google Imagens<sup>2</sup>.

## 1.4 Formação do ozônio troposférico

### 1.4.1 Formação do radical hidroxila (OH)

A compreensão da química troposférica começa pelo radical hidroxila (OH). É um radical pouco reativo em relação ao oxigênio ( $O_2$ ) e uma vez produzido sobrevive para reagir com todas as espécies traço da atmosfera. Os oxidantes mais abundantes na atmosfera são o oxigênio ( $O_2$ ) e ozônio ( $O_3$ ), mas essas moléculas têm fortes energias de ligação e geralmente são poucas reativas, exceto com certos radicais livres, o que deixa o radical hidroxila (OH) como a principal espécie oxidante da troposfera.

De acordo com Seinfeld e Pandis (2006), a fotólise de  $O_3$  em comprimentos de onda menores que 319 nm produz átomos de oxigênio nos estados fundamental (O) e excitado ( $O(^1D)$ ) sendo esse processo muito importante tanto na estratosfera como troposfera.



O oxigênio (O) no estado fundamental combina-se rapidamente com o  $O_2$  para formar novamente  $O_3$ :

2 – Disponível em:

<[https://www.google.com.br/search?hl=ptBR&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=651&ei=OLavWqHBsKYwgSSv5TIBQ&q=brisa+maritima+e+terrestre&oq=brisa+maritima+e+terrestre&gs\\_l=img..3..0j0i5i30k1j0i24k1l2.1086.9081.0.9329.36.30.4.2.2.0.313.4137.0j18j5j1.24.0....0...1ac.1.64.img..6.2.9.4163...0i19k1j0i30i19k1j0i10k1j0i30k1j0i10i24k1.0.RFYShAlklI#imgsrc=kN8y1\\_HH09aBGM:](https://www.google.com.br/search?hl=ptBR&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=651&ei=OLavWqHBsKYwgSSv5TIBQ&q=brisa+maritima+e+terrestre&oq=brisa+maritima+e+terrestre&gs_l=img..3..0j0i5i30k1j0i24k1l2.1086.9081.0.9329.36.30.4.2.2.0.313.4137.0j18j5j1.24.0....0...1ac.1.64.img..6.2.9.4163...0i19k1j0i30i19k1j0i10k1j0i30k1j0i10i24k1.0.RFYShAlklI#imgsrc=kN8y1_HH09aBGM:)>

Acesso em março de 2018.



A reação 1.1a seguida da reação 1.2 não tem efeito químico líquido, ou seja, é um ciclo nulo. Contudo, quando o  $\text{O}({}^1\text{D})$  é produzido ele pode reagir com outras espécies químicas. Frequentemente, o  $\text{O}({}^1\text{D})$  colide com nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) ou  $\text{O}_2$  removendo o excesso de energia e voltando para o estado fundamental.



Uma vez que o átomo de oxigênio (O) no estado fundamental reage apenas com o  $\text{O}_2$  pela reação 1.2 para formar  $\text{O}_3$ , então, o caminho consistindo pelas reações 1.1b, 1.3 e 1.2 é apenas outro ciclo nulo, porém, ocasionalmente, o  $\text{O}({}^1\text{D})$  colide com uma molécula de água e produz dois radicais hidroxila (OH):



A reação 1.4 é, de fato, a única reação de fase gasosa na troposfera capaz de quebrar a ligação H – O em  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### **1.4.2 Ciclo básico do ozônio ( $\text{O}_3$ ), monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ )**

Na presença de luz solar, NO e  $\text{NO}_2$ , a formação do ozônio ocorre pela fotólise do  $\text{NO}_2$  para comprimentos de onda menores que 424 nm:

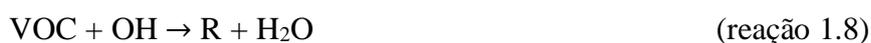


Não existem outras fontes significativas de ozônio na atmosfera além da reação 1.6. Uma vez formado, o  $\text{O}_3$  reage com o NO para regenerar o  $\text{NO}_2$ :



As três reações citadas acima chegarão a um ponto em que o  $\text{NO}_2$  é destruído e regenerado tão rápido que um ciclo estável é mantido. Esse ciclo estável pode ser alterado quando se tem a presença de CO e compostos orgânicos voláteis (VOCs) que sofrem oxidação através do radical hidroxila (OH).

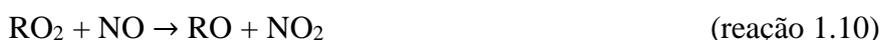
Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são oxidados pelo radical hidroxila (OH) formando o radical alquila (R) e água:



O radical Alquila reage com o oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e com uma segunda molécula (M) produzindo o radical peróxido de alquila ( $\text{RO}_2$ ):



O radical  $\text{RO}_2$  reage com o NO formando o radical alcoxi (RO) e  $\text{NO}_2$ :



Há ainda a produção do radical hidroperóxido ( $\text{HO}_2$ ) e de mais  $\text{NO}_2$  pelas duas reações abaixo descritas:



Portanto, a produção de  $\text{NO}_2$  nas reações 1.10 e 1.12 resultam em uma alta produção de ozônio pelas reações 1.5 e 1.6. O ozônio formado também é consumido pela reação 1.7, mas em razão da alta produção de  $\text{NO}_2$  há alta formação de ozônio quando a taxa de fotólise é máxima (Rojas, 2013).

### 1.4.3 Oxidação do monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono reage com o radical hidroxila:



O átomo de hidrogênio (H) formado na reação 1.13 reage rapidamente com o O<sub>2</sub> para formar o radical hidroperóxido (HO<sub>2</sub>):



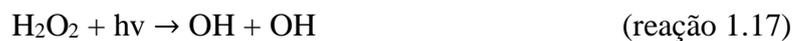
O radical HO<sub>2</sub> reage com o NO:



O radical HO<sub>2</sub> também reage com ele mesmo para formar o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>):



O peróxido de hidrogênio é temporariamente um reservatório de HO<sub>x</sub> (OH + HO<sub>2</sub>):



O NO<sub>2</sub> formado na reação 1.15 participa do ciclo fotoquímico do NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>):



Finalmente, o ciclo termina quando OH e NO<sub>2</sub> reagem para formar o ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) removendo HO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> do sistema:



## 1.5 Estudos sobre modelagem atmosférica utilizando o WRF/CHEM

A modelagem atmosférica através do desenvolvimento de modelos de qualidade do ar pode ser uma ferramenta extremamente útil para a previsão de concentrações de poluentes aliada a um baixo custo, uma vez que a aquisição de instrumentos de monitoramento de qualidade do ar demanda um grande investimento e contínua manutenção. Atualmente, o modelo numérico de mesoescala WRF/CHEM (Weather Research and forecasting/Chemistry) é o estado da arte para modelos de mesoescala para a previsão do tempo e de concentrações de poluentes atmosféricos se distinguindo de seus pares por acoplar meteorologia e química

sendo por isso chamado de modelo “online”. Modelos como o MM5 (Penn State Mesoscale Model) que tratam a parte química em separado da meteorologia são chamados de modelos “offline”.

Vela (2013) estudou o impacto da mudança dos fatores de emissão na formação do ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O período de estudo correspondeu a 06-12 de setembro de 2004 e 12-15 de novembro de 2011. O WRF/CHEM foi configurado para realizar simulações com quatro grades aninhadas com espaçamento de grade de 27, 9, 3 e 1 km, onde nas duas primeiras grades foi acionado o modo two way e nas duas últimas foi o acionado o modo one way de interação entre as grades. A topografia considerada para a grade com resolução de 1 km foi construída com base em dados topográficos fornecidos pelo sensor Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA (National Aeronautics and Space Administration), enquanto a topografia da grade com resolução de 3 km foi construída a partir de dados topográficos fornecidos pelo modelo de elevação digital desenvolvido pela USGS (United States Geological Survey). As emissões totais de poluentes que serviram como dados de entrada no modelo WRF/CHEM foram calculadas pela seguinte equação:

$$E_p = \sum_{veic=1}^5 N_{veic} \cdot FE_{p,veic} \cdot I_{veic} \quad \text{Eq. 01}$$

Onde:

$E_p$  = Emissão total do poluente  $P$ , em gramas por dia;

$N_{veic}$  = Número de veículos por tipo;

$FE_{p,veic}$  = Fator de emissão do poluente  $P$  por tipo de veículo, em gramas por quilômetro;

$I_{veic}$  = Intensidade de uso por tipo de veículo, em quilômetros por dia;

$veic$  = Índice que indica o tipo de veículo considerado.

Vela (2013) considerou a distribuição espacial das emissões para a grade com resolução de 3 km baseada na correlação entre ocupação urbana e dados de satélite de Intensidade de Luzes Noturnas (ILN), os quais foram fornecidos pelo sensor Operational Linescan System (OLS) do Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), enquanto a distribuição espacial das emissões para a grade com resolução de 1 km foi calculada de acordo com um mapa de emissão diária de CO na RMSP construído pelo International Environmental Database (IED) para o ano de 2009.

Os resultados de Vela (2013) para o período de 12 -15 de novembro de 2011 mostraram que, em geral, o modelo conseguiu representar coerentemente a variabilidade,

amplitude e queda de temperatura, produzidas pelos sistemas atmosféricos que atuaram na RMSP no período estudado. Os testes estatísticos (desvio-padrão ( $\sigma$ ), raiz do erro médio quadrático ( $RMSE$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ )), disponíveis no apêndice C, mostraram que a simulação com a grade com resolução de 3 km foi a que apresentou melhores resultados em comparação com a grade com resolução de 1 km. Os coeficientes de correlação foram, no geral, superiores a 0,7 e os  $RMSE$  (raiz do erro médio quadrático) médios foram de 1,25 e 1,51°C para as grades de 3 e 1 km, respectivamente. Com relação à umidade relativa, os testes estatísticos mostraram que a grade de 3 km foi a que melhor representou a variação temporal dos dados observados. No entanto, com coeficientes de correlação baixos em relação a duas estações de observação. Os  $RMSE$  médios foram de 7,54 e 8,4 % para as grades de 3 e 1 km, respectivamente. No caso do  $NO_x$ , novamente a grade de 3 km representou de forma mais satisfatória a variação temporal desse poluente. Os coeficientes de correlação foram menores que 0,6 e os  $RMSE$  médios foram de 23,96 e 18,43 ppbv para as grades de 3 e 1 km, respectivamente.

Rojas (2013) realizou um estudo com o WRF/CHEM para a Região Metropolitana de Lima (RML), no Peru, para simular o transporte de ozônio ( $O_3$ ) associado aos padrões de circulação atmosférica. Foram escolhidos dois períodos de estudo: 22 a 28 de janeiro de 2012 e 05 a 11 de julho de 2012. O modelo WRF/CHEM foi configurado para ser executado com três grades aninhadas com espaçamento de grade de 27, 9 e 3 km com o mecanismo ativado one way de interação entre as grades. Utilizou-se 51 níveis verticais onde o nível mais baixo era de aproximadamente 10 metros. A topografia da grade com resolução de 3 km foi alterada para uma resolução de 90 m a fim de melhorar a representação das elevações do terreno.

Para a inclusão no modelo WRF/CHEM da distribuição espacial das emissões de poluentes causadas pela frota veicular, Rojas (2013) utilizou a seguinte equação matemática para o fluxo de emissão  $E_{(i,j,k)}$ :

$$E_{(i,j,k)} = \sigma_n \cdot EF_{k,n} \cdot A_n \cdot C_1 \cdot 10^{C_1 \cdot N_n(i,j)} + f_n(i,j) \quad \text{Eq. 02}$$

onde  $EF_{k,n}$  representa o fator de emissão associado ao poluente  $k$  para o veículo do tipo  $n$ ,  $A_n$  é a atividade veicular,  $N_n(i,j)$  é a intensidade de luzes noturnas dos pontos de coordenadas  $(i,j)$ ,  $f_n(i,j)$  é uma função de correção de fundo (por exemplo, para áreas não urbanas) e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes ajustáveis em função de aspectos regionais.

Em relação aos resultados obtidos por Rojas (2013) para janeiro de 2012 e para a grade com resolução de 3 km, os perfis de temperatura simulada estão, em geral, em boa

concordância com os valores observados em quase todas as estações. Para a temperatura simulada, as correlações obtidas na maioria das estações foram em geral maiores que 0,7, enquanto os desvios-padrões dos dados simulados foram menores que os desvios-padrões dos dados observados. No caso da umidade relativa, o modelo representou satisfatoriamente a variabilidade diurna em quase todas as estações, apesar das fases mínimas e máximas não serem bem representadas. As correlações obtidas são em geral menores do que as correlações obtidas para a temperatura simulada e os desvios-padrões são menores do que os desvios padrão dos dados observados.

Em relação aos resultados obtidos por Rojas (2013) para julho de 2012 e para a grade com resolução de 3 km, os perfis de temperatura simulada estavam em boa concordância em relação aos valores observados na maioria das estações, porém o modelo subestimou os valores mínimos. As correlações obtidas são, em geral, maiores que 0,7. No caso da umidade relativa, a variação diurna foi bem representada, no entanto, o modelo teve dificuldades em representar os valores máximos. As correlações obtidas foram menores do que as obtidas para a temperatura mostrando que em termos de fase, os resultados para temperatura foram melhores. As tabelas com as testes estatísticos (desvio-padrão ( $\sigma$ ), erro médio ( $EM$ ), raiz do erro médio quadrático ( $RMSE$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ )) para as simulações de temperatura e umidade relativa durante os períodos de 22 – 28 de janeiro de 2012 e 05 – 11 de julho de 2012 estão mostradas no apêndice D.

Tie et al. (2010) avaliou o impacto da resolução horizontal adotada no modelo WRF/CHEM no cálculo das concentrações de ozônio e seus precursores na Cidade do México. As resoluções avaliadas foram 3, 6, 12 e 24 km, sendo que o WRF/CHEM não foi executado com aninhamento de grades, ou seja, as simulações com as diferentes resoluções adotadas foram realizadas separadamente. O período de estudo escolhido foi de 26 a 29 de março de 2006, porém apenas o dia 28 foi escolhido para a validação das simulações. Os autores queriam entender a influência de três fatores no cálculo das concentrações de ozônio e seus precursores, são eles: (a) a resolução dos campos meteorológicos; (b) a resolução do inventário de emissão e (c) a resolução em que as reações químicas não lineares ocorrem.

Os resultados obtidos mostraram que a resolução adotada no modelo tem efeitos importantes no cálculo das concentrações de ozônio e seus precursores em uma área urbana altamente povoada como a Cidade do México. As concentrações simuladas de ozônio, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio foram simuladas razoavelmente nas resoluções de 3 e 6 km e leves subestimações ocorreram na grade de 12 km. Entretanto, a grade de 24 km apresentou uma performance muito fraca em comparação ao dados observados de poluentes

do ar. Os autores, então, sugeriram que a resolução de 12 km adotada no WRF/CHEM é a resolução limite que se pode adotar ao simular as concentrações de poluentes na Cidade do México.

Kuik et al. (2016), utilizaram o WRF/Chem para a avaliar a acurácia do modelo em simular a temperatura, velocidade e direção do vento e as concentrações de NO<sub>x</sub> em Berlim – Brandenburg, onde os dados de uso do solo USGS do WRF foi substituído por 50 categorias de uso do solo para uma melhor representação da região de Berlim. O modelo foi configurado com três grades aninhadas na direção one way com espaçamento de grade de 15, 3 e 1 km para realizar simulações durante o período de 31 de maio a 28 de agosto de 2014. Os autores realizaram quatro tipos de simulações:

- Base: Utilização das configurações padrões do WRF/CHEM;
- S1\_urb: Representação atualizada dos dados de cobertura de solo e de outros parâmetros urbanos para a região de Berlim onde se atribuiu a categoria de uso de solo mais abundante dentro de uma célula de grade a toda célula respectiva;
- S2\_mos: Consideração da heterogeneidade das categorias de uso do solo dentro de uma célula de grade do modelo (abordagem mosaica);
- S3\_emi: Fazendo um aumento da resolução horizontal de 7 km do inventário de emissão para uma resolução mais fina de 1 km.

Os resultados mostraram que o viés máximo das quatro simulações é melhorado com o aumento da resolução de 15 km para 3 km para simular as concentrações de NO<sub>x</sub> em uma cidade do tamanho de Berlim, mesmo com dados de emissão em uma resolução mais grossa (7 km x 7 km). A comparação entre o viés médio mostrou ainda que a utilização do inventário de emissões com resolução horizontal de 7 km não melhorou os resultados para a resolução de 1 km em relação à resolução de 3 km. Avaliando os resultados do modelo com os dados observados em estações localizadas apenas em áreas urbanas, o modelo WRF/CHEM subestimou as concentrações de NO<sub>x</sub> durante o dia e superestimou a noite para as quatro simulações realizadas. Com relação à temperatura simulada a 2 metros, a correlação com as observações ficaram entre 0,88 e 0,91 para todos os domínios do modelo, o que mostra que o modelo representou bem a variabilidade da temperatura observada. A velocidade horária do vento simulada correlacionou-se com as observações com coeficientes de correlação entre 0,5 e 0,6 e a direção do vento mais frequentemente observada para quatro estações foi de oeste

sendo tal fato reproduzido pelo modelo e com melhor acurácia com o aumento da resolução, porém sem uma diferença significativa entre as três resoluções adotadas. As análises estatísticas para as simulações de temperatura e  $\text{NO}_x$  estão descritas no apêndice E onde se considerou a média, o erro médio e o coeficiente de correlação.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo Geral**

Avaliar a qualidade do ar ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ) na cidade de Maceió-AL utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

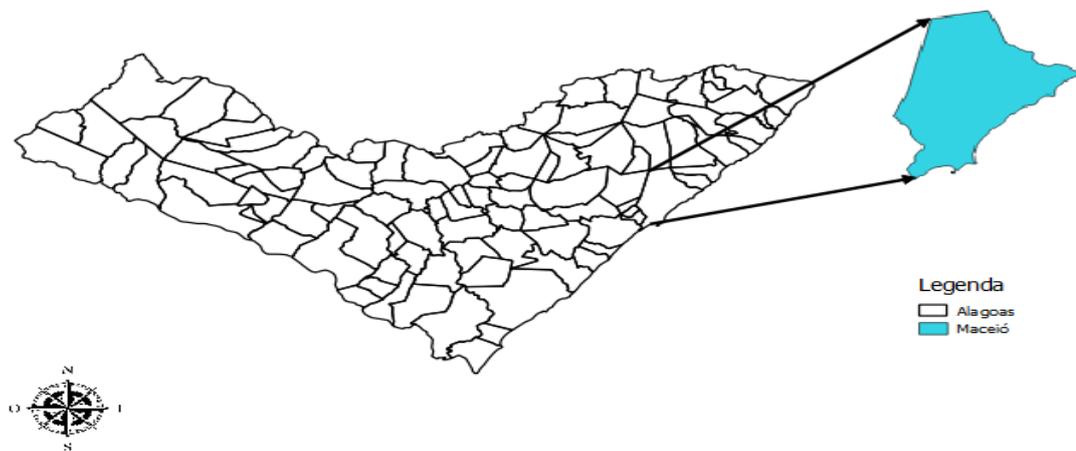
- Determinar qual resolução horizontal adotada no modelo (5 ou 1 km) WRF/CHEM oferece melhores resultados para as simulações dos valores observados de variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade e direção do vento) e de concentrações de dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ).
- Determinar qual das quatro simulações executadas no modelo WRF/CHEM oferece melhores resultados para as simulações dos valores observados de variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade e direção do vento) e de concentrações de dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). As simulações executadas são: Default - simulação com a topografia e uso do solo padrões do modelo; Topo - simulação com a topografia atualizada e uso do solo padrão; IGBP - simulação com a topografia padrão e uso do solo atualizado; Topo\_IGBP - simulação com a atualização da topografia e uso do solo.
- Avaliar a precisão do modelo WRF/CHEM, através de análise estatística, em simular os valores observados de variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa e velocidade e direção do vento) e de concentrações de dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ) na cidade de Maceio-AL.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

O município de Maceió-AL encontra-se na região Nordeste do Brasil, na latitude 9° 39' 75" sul e longitude 35° 44' 07" oeste, às margens do Oceano Atlântico, ver figura 2.1. Tem uma área aproximada de 510 km<sup>2</sup> dos quais 212 km<sup>2</sup> de área urbana onde se localiza a cidade de Maceió que possui uma população de um pouco mais de 1 milhão de habitantes (IBGE, 2017).

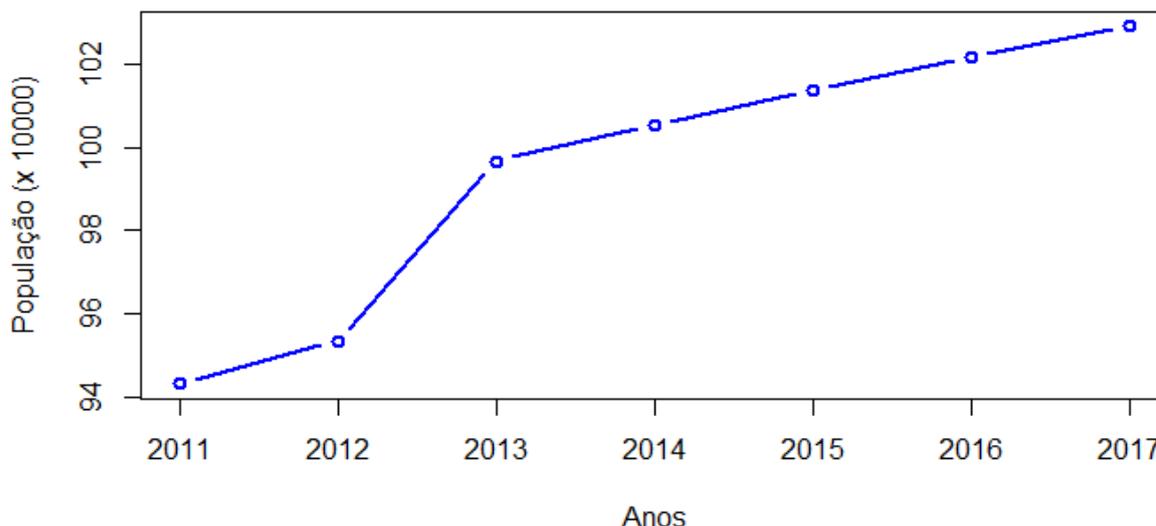
**Figura 2.1 - Localização da área de estudo.**



**Fonte:** Autor (2018).

A Figura 2.2 mostra a variação da população de Maceió durante os anos de 2011 a 2017. A cada ano tem se verificado um crescimento da população e, conseqüentemente, mais pessoas estão expostas aos problemas decorrentes da poluição urbana.

**Figura 2.2 – Variação anual da população de Maceió-AL durante os anos de 2011 a 2017.**



**Fonte:** Autor (2018).

## **2.2 Modelo Atmosférico WRF/CHEM (Weather Research and forecasting/Chemistry)**

O modelo atmosférico WRF/CHEM (Weather Research and forecasting/Chemistry) é um modelo de previsão do tempo, clima e qualidade do ar desenvolvido através da parceria entre várias instituições de pesquisa: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, University of Oklahoma e Federal Aviation Administration (FAA).

O WRF/CHEM é um modelo não hidrostático com vários núcleos dinâmicos bem como diferentes escolhas de parametrizações físicas para processos que não podem ser resolvidos pelo modelo permitindo que seja aplicado em diferentes escalas (Grell et al., 2005). Possuem vários módulos químicos dentro de sua estrutura que são tratados simultaneamente com a parte meteorológica, ou seja, a componente química usa os mesmos esquemas de transporte, esquemas físicos e a mesma grade do módulo meteorológico (Calderon, 2015).

Todos os processos físico-químicos da atmosfera são simulados e previstos de forma simultânea (“*online*”). Embora o WRF/CHEM tenha várias possibilidades de escolhas de núcleos dinâmicos, ele trabalha com o núcleo dinâmico ARW (Advanced Research WRF) onde as equações de prognóstico integradas são colocadas na forma conservativa (fluxo) para as variáveis conservadas. Variáveis não conservadas como pressão e temperatura são diagnosticadas a partir do prognóstico das variáveis conservadas (Grell et al., 2005).

O mecanismo químico fase gás RADM2 (The second generation Regional Acid Deposition Model) foi o escolhido para o presente trabalho. O RADM2 é um compromisso entre o detalhe químico, precisão das previsões e avaliação de recursos computacionais sendo amplamente usado em modelos atmosféricos para prever concentrações de oxidantes e outros poluentes do ar (Grell et al.,2005). O mecanismo químico RADM2 é altamente não linear, considerando ozônio, sulfato, ácido nítrico e as concentrações de peróxido de hidrogênio como funções complicadas de  $\text{NO}_x$  e de concentrações de hidrocarbonetos não metano (Rojas, 2013).

As espécies inorgânicas incluídas no mecanismo RADM2 são 14 espécies estáveis, 4 de reatividade intermediária e 3 espécies estáveis abundantes (oxigênio, nitrogênio e água). A química orgânica da atmosfera é representada por 26 espécies estáveis e 16 radicais peróxidos.

As frequências de fotólises para 21 reações fotoquímicas da fase gás do modelo são calculadas para cada ponto de grade (Grell et al.,2005). A ativação ou dissociação de espécies químicas através da conversão de radiação solar em energia química chama-se fotodissociação (Silva Júnior et al.,2012). Portanto, de acordo com Grell et al.(2005), a frequência de fotólise de um gás  $i$ ,  $J_i$ , realizada pela sua fotodissociação é dada por:

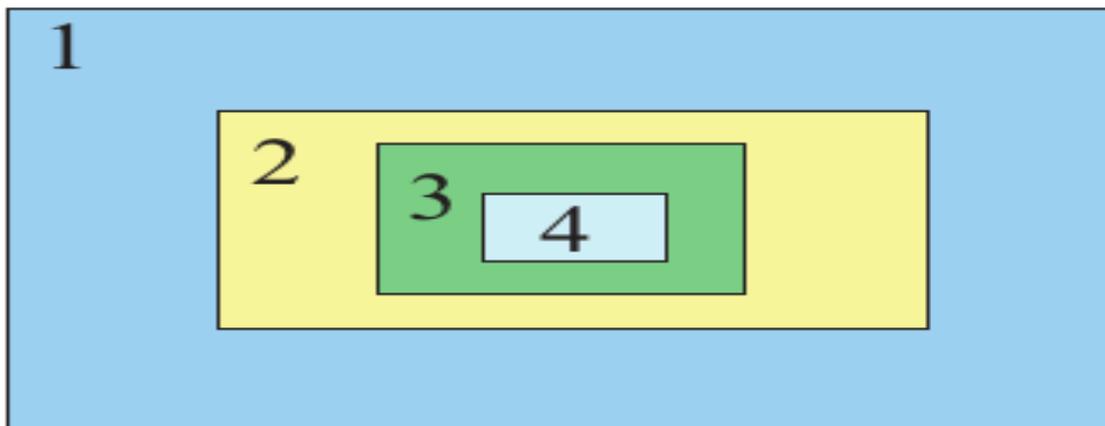
$$J_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_A(\tau, \lambda) \sigma_i(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda \quad \text{Eq. 03}$$

onde  $I_A(\lambda)$  é o fluxo actínico ( $\text{fótons.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}.\text{nm}^{-1}$ ),  $\sigma_i(\lambda)$  é a seção de absorção transversal de cada molécula ( $\text{cm}^2.\text{molécula}^{-1}$ ),  $\phi_i(\lambda)$  são os rendimentos quânticos das reações de fotólise ( $\text{molécula.fóton}^{-1}$ ) e  $\lambda$  (nm) é o comprimento de onda da radiação incidente.

O WRF/CHEM possui diferentes esquemas de parametrizações físicas para os diversos processos de escala sub-grade: radiação de onda curta e longa, microfísica, cúmulos, camada superficial, superfície terrestre e camada limite planetária (Calderon, 2015). Em Skamarock et al. (2008) há uma descrição completa de todas as parametrizações citadas.

A versão 3.9 do WRF/CHEM de abril de 2017 suporta o aninhamento horizontal de grades onde as grades aninhadas devem ser retangulares e alinhadas com a grade maior (Rojas, 2013). O aninhamento pode ser configurado para realizar a interação entre as grades de duas formas. No modo **one way** os resultados das simulações na grade maior são utilizados como condição de contorno para a grade menor. O modo **two way** é similar ao **one way**, porém os valores das simulações nos pontos da grade maior que estão dentro da grade menor são alterados para os valores obtidos na grade aninhada (figura 2.3).

**Figura 2.3 - Aninhamento de grades no WRF/CHEM.**



**Fonte:** Skamarock et al. (2008).

## 2.2.1 Configurações do Modelo

### 2.2.1.1 Domínios de simulação

O modelo foi configurado para realizar simulações com duas grades aninhadas. A grade maior foi configurada com 81x 81 pontos nas direções xy e espaçamento de grade de 5 km, enquanto a grade menor foi configurada com 81 x 81 pontos nas direções xy e espaçamento de grade de 1 km. A tabela 2.1 mostra as propriedades dos domínios considerados.

**Tabela 2.1 - Propriedades dos domínios considerados.**

<b>Domínios e suas propriedades</b>	<b>Valor</b>
Número de pontos leste/oeste	81
Número de pontos norte/sul	81
Níveis Verticais	31
Espaçamento de grade	5 km / 1 km
Projeção cartográfica	Mercator
Latitude do centro	-9.6372
Longitude do Centro	-35.7361

**Fonte:** Autor (2018).

Optou-se por realizar as simulações com as grades aninhadas e acionando o modo one way de interação entre elas, ou seja, não há um feedback entre as grades. Tal mecanismo foi usado para eliminar erros de conservação de massa, ou seja, pelo fato da escala de tempo do erro de conservação de massa ser maior do que a escala de tempo do transporte, transformação e processos de remoção que determinam a distribuição das espécies químicas de interesse (Rojas, 2013), o que gera inconsistência entre as grades aninhadas, caso se utilize o modo two-way. Outro fator importante para a escolha da direção one way se deve ao fato de se poder fazer uma comparação sobre a acurácia das simulações com as resoluções de 5 e 1 km sem levar em consideração a interferência que uma grade causaria na outra caso se utilizasse a direção two way.

### **2.2.1.2 Configuração física e química**

Utilizou-se o mecanismo químico RADM2 sem considerar a formação de aerossóis (chem\_opt = 1) para gerar os resultados. O resumo das configurações físicas e químicas, utilizadas neste trabalho, está mostrado na tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Parametrizações físicas e químicas.**

<b>Opção física</b>	<b>Parametrização utilizada</b>
Radiação de onda longa	RRTMG (Iacono et al.,2008)
Radiação de onda curta	Goddard (Chou et al.,1998)
Camada superficial	Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)
Superfície terrestre	NOAH Land Surface Model (Ek et al.,2003)
Camada limite planetária	Asymmetrical Convective Model (Pleim, 2007)
Microfísica	Purdue Lin et al. Scheme (Lin et al.,1983)
Cúmulos	Grell-3d (2008)
<b>Opção química</b>	
Mecanismo químico	RADM2 (Stockwell et al.,1990)
Fotólise	Madronich (Madronich,1987)

**Fonte:** Autor (2018).

### **2.2.1.3 Inventário de emissão**

Esta subseção descreve toda a metodologia necessária para a construção de um inventário de emissões veiculares para uma metrópole de porte médio como Maceió-AL. Tal metodologia pode ser usada com as devidas adequações para a construção de inventários para outras cidades brasileiras.

Um inventário de emissões é um conjunto de dados que estima a quantidade de emissão de determinados poluentes atmosféricos a partir de fontes especificadas levando em consideração certa área geográfica e um dado período de tempo. A construção de um inventário bem detalhado ajuda a compreender e estreita a relação entre emissão e concentração de poluentes na atmosfera e, portanto, é bastante útil na elaboração de políticas

públicas que ajudem a reduzir as concentrações de poluentes danosos à saúde humana (CETESB, 2016).

Para a elaboração do Inventário de Emissões Veiculares para a Cidade de Maceió – AL utilizou-se a metodologia bottom-up<sup>3</sup> que considera separadamente a contribuição de cada fonte na emissão de determinado poluente atmosférico. Os gases de exaustão são lançados na atmosfera através da queima do combustível no motor do veículo. Há ainda o lançamento de gases pelo processo de evaporação do combustível armazenado no tanque do veículo e também pelo processo de abastecimento nos postos de gasolina. Os gases de exaustão inventariados neste trabalho foram o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP). Também se inventariou as emissões evaporativas e de abastecimento constituídas por vapores de gasolina e etanol e definidas como hidrocarbonetos não metano (NMHC).

Foram consideradas apenas as emissões de poluentes por veículos automotores, uma vez que elas representam a maior parte do total emitido nas grandes cidades. Foram calculadas as emissões totais em toneladas por ano para os poluentes monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos não metano (NMHC) e material particulado (MP). Optou-se por seguir a metodologia proposta no Relatório de Emissões Veiculares publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) publicado no ano de 2016.

#### **2.2.1.3.1 Emissões de Escapamento**

Para calcular as emissões de escapamento são necessários os dados de fator de emissão por tipo de veículo, poluente e combustível, a quilometragem média ou intensidade de uso e o número de veículos por categoria, combustível e ano de fabricação.

De acordo com CETESB (2016) a equação geral utilizada para o cálculo das emissões de escapamento é dada por:

$$E = Fr \times Fe \times Iu \quad \text{Eq. 04}$$

onde:

E = Massa do poluente emitida durante o ano que se quer inventariar (g/ano);

Fr = Frota circulante, ou seja, número de veículos por categoria, combustível e ano de fabricação;

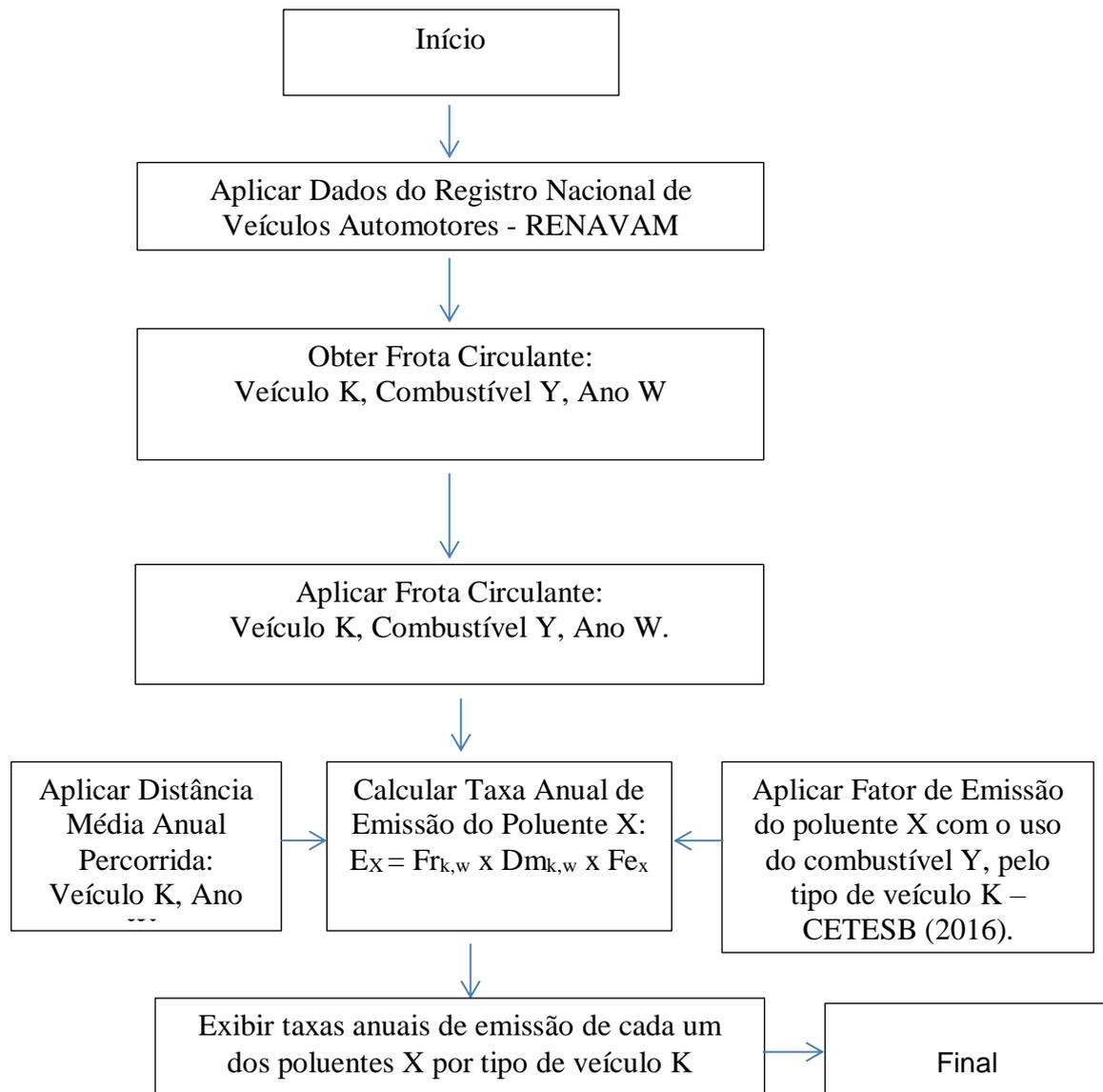
Fe = Fator de emissão, depende do tipo de veículo, poluente e combustível utilizado (g/km);

3 – Metodologia utilizada quando se dispõe de dados detalhados para estimar as emissões de poluentes de uma área geográfica bem caracterizada. É bastante precisa, porém nem sempre é possível obter toda a informação necessária para a realização dos cálculos.

Iu = Intensidade de uso ou quilometragem média anual percorrida pelo veículo.

O modelo geral utilizado para inventariar as emissões de poluentes está descrito abaixo onde se utiliza as informações relativas ao número de veículos de determinada categoria, fatores de emissão (por tipo de veículo, combustível e poluente) e distância média percorrida anualmente em função da idade do veículo.

**Figura 2.4 - Diagrama esquemático com as etapas da metodologia proposta.**



Fonte: Autor (2018).

Intensidade de uso é a distância percorrida pelo veículo ao longo de um ano. Tal distância depende do tipo e idade do veículo. Expressa em quilômetro por ano (km/ano).

Fator de emissão é a massa de poluente emitida pelos veículos ao percorrer determinada distância. Expresso em gramas por quilômetro (g/km). Todos os fatores de

emissão e valores de intensidade de uso utilizados neste trabalho foram retirados do Relatório de Emissões Veiculares publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no ano de 2016.

Frota Circulante é a quantidade de veículos que estão em circulação nas cidades independentemente de estarem licenciados ou registrados no órgão de trânsito. No presente trabalho a frota circulante em Maceió-AL foi tomada como sendo igual ao número de veículos que consta no Registro Nacional de Veículos Automotores (RENAVAM). As categorias de veículos utilizadas para os cálculos das emissões de poluentes estão descritas na tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Definição das Categorias de Veículos em Maceió - AL.**

Categories	Combustível	Definição
<b>Automóveis</b>	Gasolina Etanol Flex	Veículo automotor destinado ao transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, inclusive o condutor.
<b>Veículos Comerciais Leves</b>	Gasolina Etanol Flex Diesel	Veículo automotor destinado ao transporte de pessoas ou carga, com peso bruto total de até 3.500 kg.
<b>Motocicletas</b>	Gasolina Flex	Veículo automotor de duas rodas, com ou sem side-car, dirigido em posição montada.
<b>Caminhões</b>	Diesel	Veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroçaria, e peso bruto total superior a 3.500 kg.
<b>Ônibus Urbanos</b>	Diesel	Veículo automotor de transporte coletivo dentro do município, de uso intermunicipal nas regiões metropolitanas e os midi-ônibus.
<b>Micro-Ônibus</b>	Diesel	Veículo automotor para transporte coletivo com capacidade para até vinte passageiros, para uso urbano, intermunicipal ou rodoviário, incluindo os mini-ônibus.

**Fonte:** Autor (2018).

O levantamento da quantidade de veículos em circulação levou em consideração os dados presentes no Registro Nacional de Veículos Automotores (RENAVAM) tendo como base o ano de 2016 (tabela 2.4).

**Tabela 2.4 - Distribuição da frota por categoria em 2016 para Maceió - AL.**

<b>Categoria</b>	<b>Distribuição da frota</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>Automóveis</b>	177.548	61,2
<b>Comerciais Leves</b>	32.486	11,2
<b>Motocicletas</b>	68.370	23,6
<b>Caminhões</b>	8.388	2,9
<b>Ônibus Urbanos</b>	2.120	0,7
<b>Micro – Ônibus</b>	1.159	0,4
<b>Total</b>	290.071	100

**Fonte:** Autor (2018).

A distribuição dos veículos por categoria e combustível é mostrada na tabela 2.5.

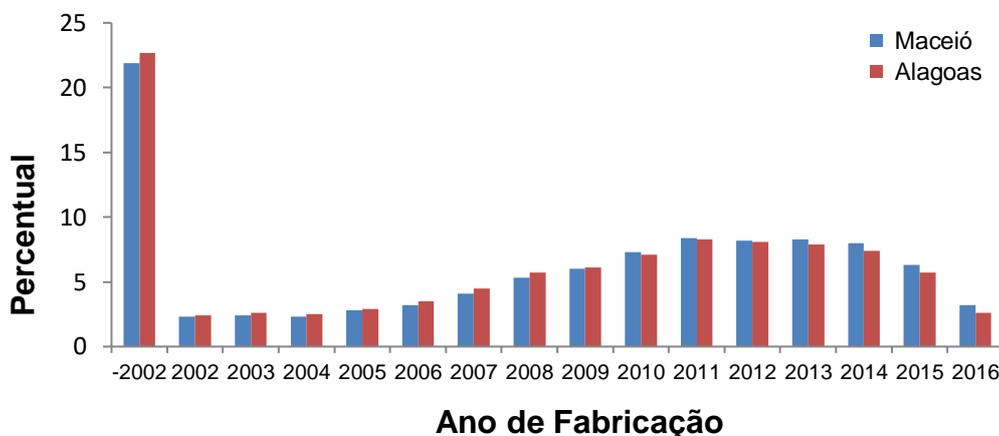
**Tabela 2.5 - Distribuição da frota por categoria e combustível em 2016 para Maceió – AL - (\*)**  
 Gasolina comercial vendida nos postos de combustíveis. Possui em sua composição etanol anidro (obtido da cana de açúcar e com teor de água próximo de zero), em percentual que varia de 18% a 27% do volume total (CETESB, 2016).

<b>Categoria</b>	<b>Gasolina C*</b>	<b>Etanol</b>	<b>Diesel</b>	<b>Flex</b>
<b>Automóveis</b>	67.890 (38,2%)	8.979 (5,1%)	-	100.679 (56,7%)
<b>Comerciais Leves</b>	12.422 (38,2%)	1.643 (5,1%)	11.184 (34,4%)	7.237 (22,3%)
<b>Motocicletas</b>	26.144 (38,2%)	-	-	42.226 (61,8%)
<b>Caminhões</b>	-	-	8.388 (100%)	-
<b>Ônibus Urbanos</b>	-	-	2.120 (100%)	-
<b>Micro – Ônibus</b>	-	-	1.159 (100%)	-

**Fonte:** Autor (2018).

Em relação à categorização dos veículos por idade, nota-se que mais de um quarto das frotas de Alagoas e Maceió são formadas por veículos com mais de 15 anos de uso (figura 2.5).

**Figura 2.5 - Percentual da distribuição de veículos por idade no período de -2002 até 2016 para Maceió (azul) e Alagoas (vermelho).**



Fonte: Autor (2018).

#### **2.2.1.3.2 – Emissões de poluentes pelos veículos automotores**

As emissões de CO, NO<sub>x</sub>, MP e NMHC dos veículos em circulação na cidade de Maceió – AL foram calculadas de acordo com a metodologia proposta pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). O ano de 2016 foi tomado com referência onde se estimou uma frota de aproximadamente 290 mil veículos dentre as categorias Automóveis, Comerciais Leves, Motocicletas, Caminhões, Ônibus Urbanos e Micro-Ônibus (RENAVAM, 2016).

A frota veicular de Maceió-AL emitiu 10.445 toneladas de CO, 2595 toneladas de NO<sub>x</sub>, 57 toneladas de MP e 786 toneladas de NMHC (tabela 2.6).

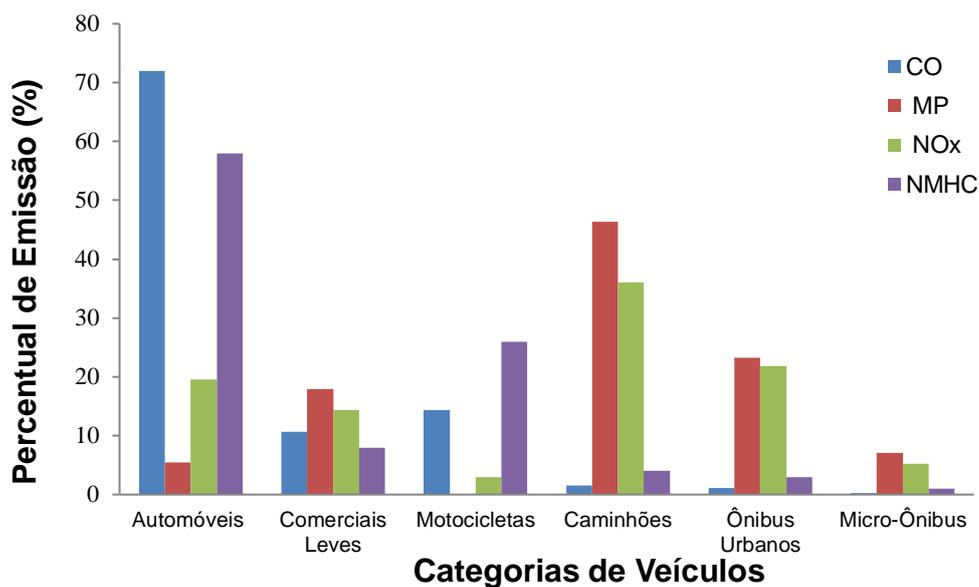
Os automóveis que compõem aproximadamente 62% da frota de veículos são responsáveis por 72% do total de emissão de CO e 58% do total de emissão de NMHC. A categoria caminhões que representa apenas 3% dos veículos em circulação emite 36% do total de emissão de NO<sub>x</sub> e 47% do total de emissão de MP (figura 2.7).

**Tabela 2.6 - Total de Emissões em 2016 de CO, NOx, MP e NMHC para a cidade de Maceió – AL em toneladas por ano (t/ano).**

<b>Emissões (t)</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>MP</b>	<b>NMHC</b>
<b>Automóveis</b>	7518	508	3	452
<b>Comerciais Leves</b>	1114	372	10	67
<b>Motocicletas</b>	1502	75		207
<b>Caminhões</b>	167	937	26	35
<b>Ônibus Urbanos</b>	117	567	13	20
<b>Micro-Ônibus</b>	27	135	4	6
<b>Total</b>	10.445	2595	57	786

Fonte: Autor (2018).

**Figura 2.6 – Percentual de emissão de poluentes por categoria de veículos.**

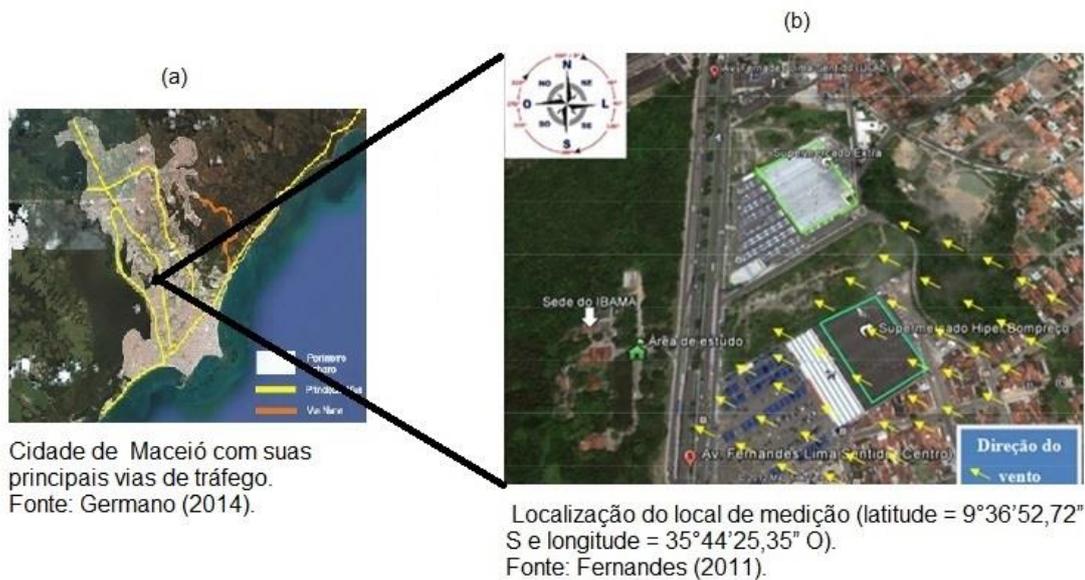


Fonte: Autor (2018).

## 2.2.2 Local de medição de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

Na figura abaixo é possível perceber que ao lado do local de medição se encontra a Avenida Fernandes Lima, sendo esta a mais movimentada em termos de tráfego de veículos em Maceió – AL. Nota-se também que a direção predominante do vento é de sudeste e que o local de medição encontra-se cercado por uma área remanescente de vegetação.

**Figura 2.7 – Cidade de Maceió-AL com suas principais vias de tráfego e local de medição.**



**Fonte:** Autor (2018).

## 2.2.3 Validação das simulações

### 2.2.3.1 Concentrações de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

A medição das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) ocorreu de forma contínua e com frequência de 10 minutos, por um analisador NITROGEN OXIDE ANALISER – Modelo 200A (figura 2.8). Tais medições foram utilizadas para avaliar a precisão do modelo em simular as concentrações de NO<sub>2</sub>.

**Figura 2.8 - Analisador NITROGEN OXIDE ANALISER – Modelo 200A** - Utilizado para medir concentrações de NO e NO<sub>x</sub>.



Fonte: Fernandes (2011).

### 2.2.3.1.1 Princípio de funcionamento do Analisador NITROGEN OXIDE ANALISER - Modelo 200A

O instrumento mede a intensidade da luz da reação de quimiluminescência, reação química onde a mistura de reagentes produz a emissão de luz, entre os gases óxido de nitrogênio (NO) e ozônio (O<sub>3</sub>). A reação é dada da seguinte forma:



A reação entre o ozônio e NO resulta em moléculas de NO<sub>2</sub> excitadas eletronicamente (NO<sub>2</sub><sup>\*</sup>) que liberam o excesso de energia através da emissão de fótons (luz infravermelha (hν)) e decaem para um nível de energia mais baixo. A intensidade da luz produzida é diretamente proporcional à concentração de NO presente.

Interligado a uma bomba de sucção a vácuo, todo o ar do ambiente era conduzido para o ambiente interno do analisador por uma mangueira de teflon azul de  $\frac{1}{4}$  de polegadas com comprimento de 10 metros e espessura de 6,32 mm, passando por um filtro, a fim de eliminar o material particulado (Fernandes, 2011). Um conversor contendo molibdênio (Mo) aquecido a 315°C converte todo o NO<sub>2</sub> em NO através da reação:



O analisador mede agora a concentração total de  $\text{NO}_x$ . A concentração de  $\text{NO}_2$  é dada pela diferença entre as concentrações de  $\text{NO}_x$  e  $\text{NO}$ .

### **2.2.3.2 Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento**

Não estão disponíveis dados horários de temperatura e umidade relativa para o local de medição de  $\text{NO}_2$  deste trabalho, então se optou por utilizar os dados registrados no Banco de Dados Meteorológicos (BDMET) da estação convencional localizada em  $9^\circ 39' 36''$  de latitude sul e  $35^\circ 42'$  de longitude oeste e a uma altitude de 64,5 metros. Os dados estão registrados apenas para as horas 00, 12 e 18 UTC. Os dados horários de velocidade e direção do vento foram extraídos da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na latitude  $9^\circ 33' 04''$  sul e longitude  $35^\circ 46' 13''$  oeste, a uma altitude de 80 metros. Portanto, como o local de observação é diferente do local de estudo obviamente serão encontradas diferenças entre o simulado e o observado. Também se deve levar em consideração que os resultados simulados se referem ao primeiro nível do modelo (1000mb).

### **2.2.4 Distribuição espacial e temporal das emissões no WRF/CHEM**

As emissões anuais totais (em toneladas) de cada poluente inventariado foram convertidas para as unidades de entrada específicas do WRF/CHEM, ou seja, para  $\text{mol.km}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  no caso dos poluentes  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  e NMHC. Os NMHC fazem parte de uma categoria de poluentes chamada de Compostos Orgânicos Voláteis que engloba várias espécies químicas além do Metano ( $\text{CH}_4$ ), a saber: Etanos, Alcanos, Etilenos, Alcenos, Aromáticos, Formaldeídos e Acetaldeídos.

Depois da conversão das unidades se faz necessário distribuir espacialmente e temporalmente as emissões nos arquivos de emissões referentes aos domínios a serem utilizados: `wrfchemi_d01` (para o domínio 1) e `wrfchemi_d02` (para o domínio 2). Os arquivos de emissões foram gerados por um programa escrito na linguagem de programação Fortran que foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem Atmosférica e Instrumentação Meteorológica do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Germano (2014) mapeou os pontos de emissão relacionados às fontes móveis das principais vias de tráfego de Maceió-AL, totalizando 250 pontos de emissão com espaçamento de aproximadamente 1 km com o auxílio do Google Earth, inclusive atribuindo

pesos aos pontos de congestionamento. A figura 2.9 mostra a distribuição espacial dos pontos de emissão e a tabela 2.7 as distribuições dos pesos.

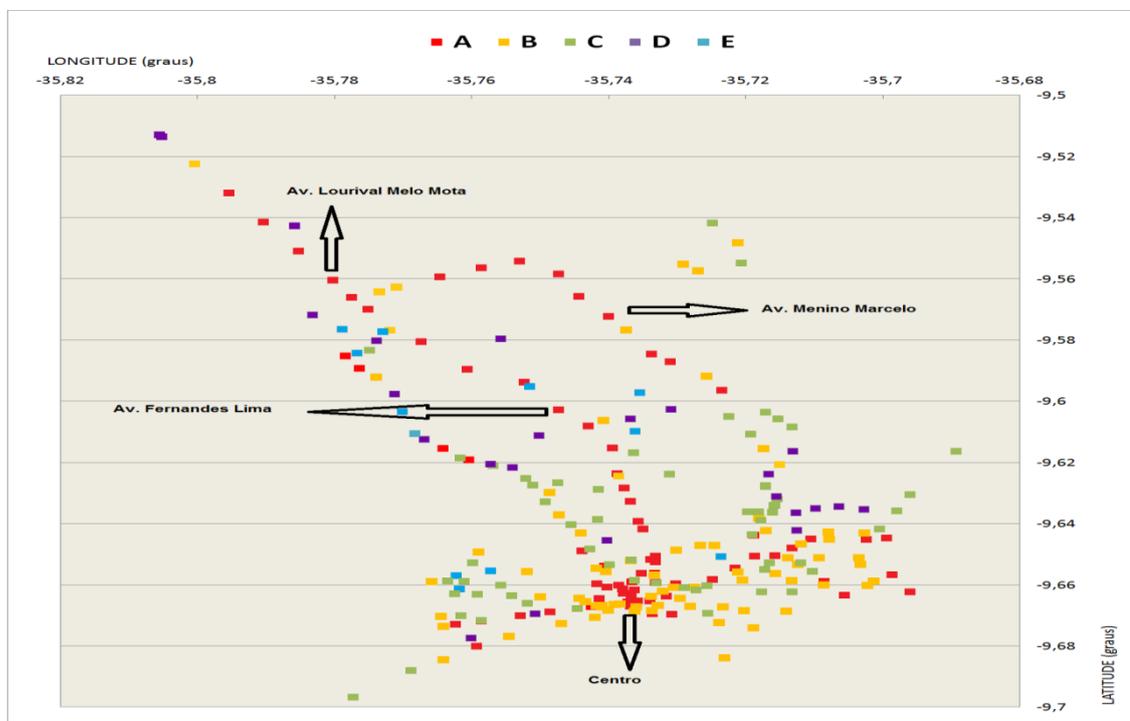
**Tabela 2.7 - Identificação das vias de Maceió-AL com base no tráfego de veículos.**

Identificação de vias	Peso	Classificação
A	5	Vias de tráfego muito pesado
B	4	Vias de tráfego pesado
C	3	Vias de tráfego meio pesado
D	2	Vias de tráfego médio
E	1	Vias de tráfego leve

Fonte: Germano (2014).

A distribuição espacial dos pontos de emissão é dada pela figura 2.9.

**Figura 2.9 - Distribuição espacial dos pontos de emissão.**

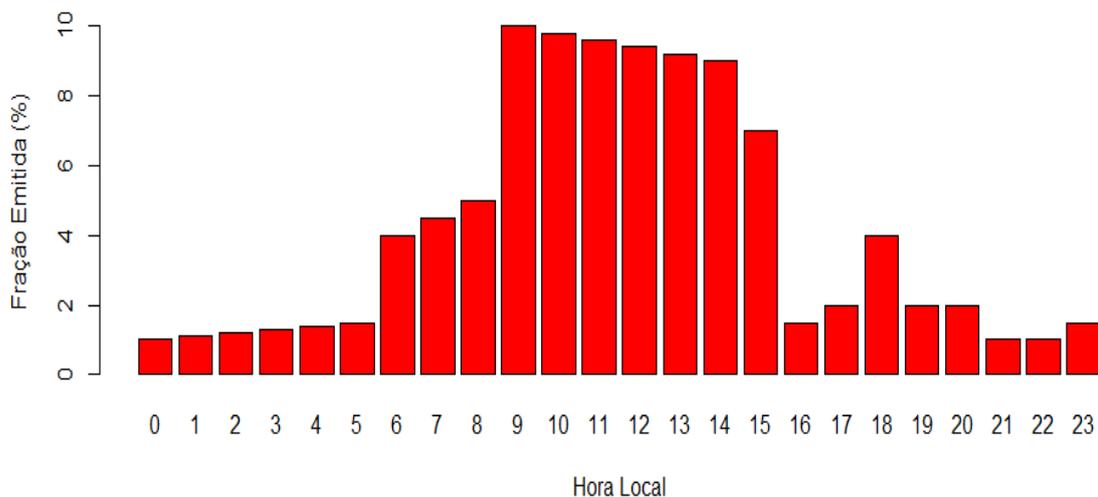


Fonte: Germano (2014).

Tendo em vista que os dados obtidos no inventário de emissões expressa a quantidade anual e para toda área urbana de Maceió, foi feita também uma variação temporal horária das emissões de tal forma a representar a variação do tráfego nas vias maceioenses, ou seja,

distribuir as emissões ao longo do dia para que o modelo WRF/CHEM assimile a variação do tráfego de veículos de acordo com a hora do dia. Tal perfil temporal foi construído com base na emissão horária de NO<sub>x</sub> utilizada no trabalho de Vela (2013), porém fazendo ajustes de emissão mais acentuados nas 16 e 17 horas locais. Foi utilizada a mesma distribuição horária de emissão para o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos não metano (figura 2.10).

**Figura 2.10 - Perfil temporal das emissões.**



**Fonte:** Autor (2018).

### 2.2.5 Fator de correção de emissão

As emissões em cada ponto de grade que o WRF/CHEM considerou foram colocadas da seguinte forma:

$$E = \frac{625 * E_p}{\left(\frac{dx}{1000} * \frac{dy}{1000}\right)} \quad \text{Eq. 05}$$

onde E é a emissão em cada ponto de grade, E<sub>p</sub> é a emissão de entrada no modelo para determinado poluente (mol.km<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), e dx, dy são os espaçamentos de grade horizontal e vertical, respectivamente, ambos dados em metros. O fator de correção tem a função de aumentar as emissões em cada ponto de grade do modelo uma vez que a assimilação pelo WRF/CHEM das emissões totais dos poluentes inventariados sem tal fator gerou concentrações de NO<sub>2</sub> muito subestimadas em relação aos dados observados, o que impossibilitou qualquer tipo de comparação.

### 2.2.6 Atualização da topografia e uso do solo

Para melhorar a representação de superfície no WRF/CHEM foi realizada uma atualização da topografia utilizando dados do projeto Brasil em relevo que inclui como fontes primárias modelos de elevação digital, com aproximadamente 90 metros de resolução espacial. O uso do solo também foi atualizado utilizando dados do ano de 2001 com resolução horizontal de 250 metros e obtidos com base no Programa Internacional Biosfera Geosfera ([http://webmap.ornl.gov/wcsdown/wcsdown.jsp?dg\\_id=10004\\_1](http://webmap.ornl.gov/wcsdown/wcsdown.jsp?dg_id=10004_1) – “*IGBP global vegetation classification scheme*”) (Silva Júnior et al., 2016).

As categorias de uso do solo utilizadas no WRF/CHEM estão descritas na tabela 2.8.

**Tabela 2.8 – Categorias de uso do solo do WRF/CHEM.**

<b>Categoria de uso do solo</b>	<b>Descrição</b>
1	Floresta alta
2	Floresta alta
3	Floresta alta
4	Floresta alta
5	Floresta mista
6	Floresta rasteira
7	Floresta rasteira
8	Árvores e savanas
9	Savanas
10	Pastos selvagens
11	Vegetação alagada
12	Área cultivada
13	Urbano
14	Área cultivada
15	Neve e gelo
16	Solo exposto (arenoso)
17	Água

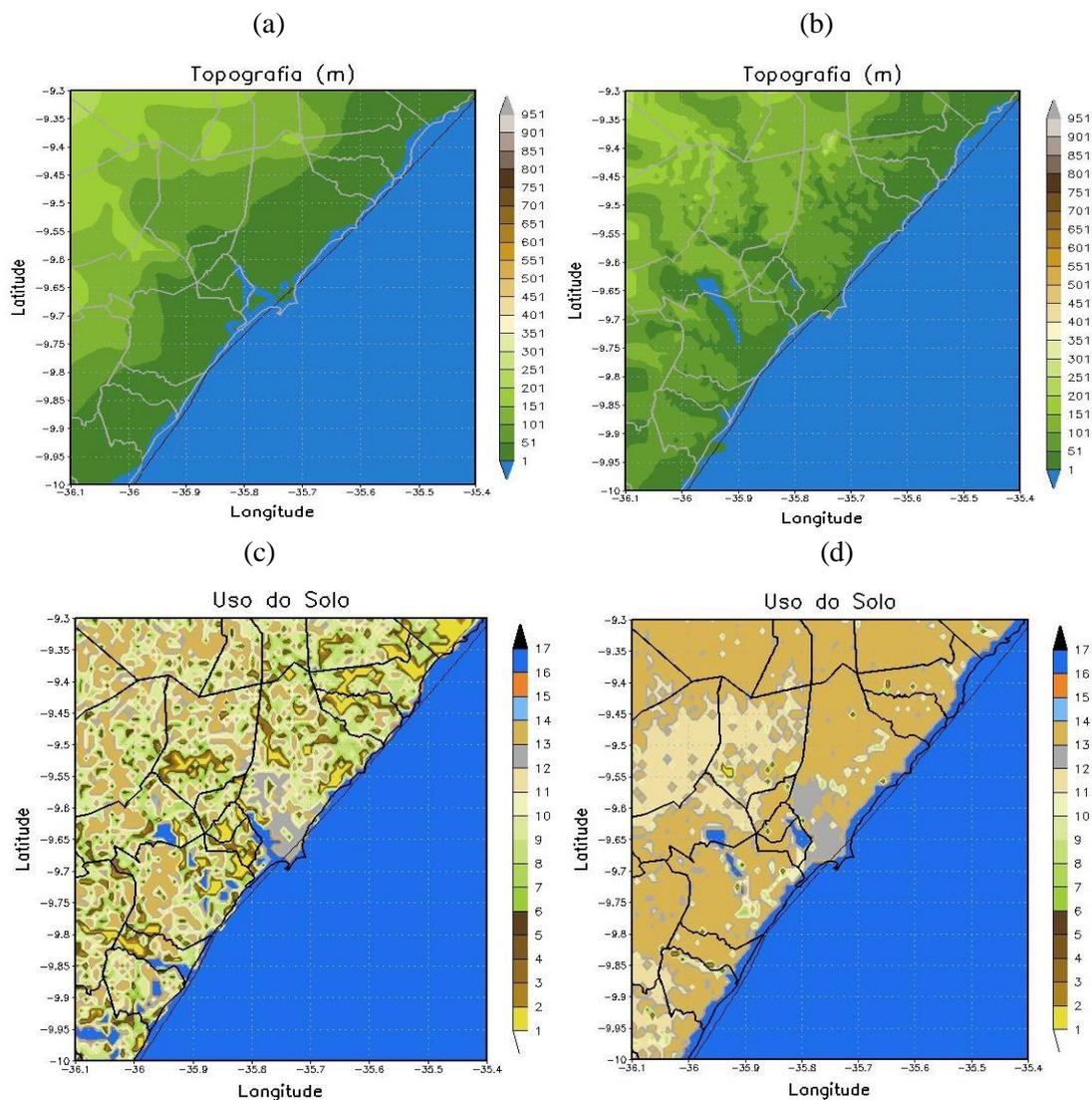
**Fonte:** Autor (2018).

O modelo WRF/CHEM foi configurado para realizar quatro simulações:

- Default - Simulação com a topografia e uso do solo padrões do modelo;
- Topo - Simulação com a topografia atualizada e uso do solo padrão do modelo;
- IGBP - Simulação com a topografia padrão do modelo e uso do solo atualizado;
- Topo\_IGBP - Simulação com a atualização da topografia e uso do solo.

A figura 2.11 mostra a topografia e uso do solo para a cidade de Maceió-AL antes e depois das atualizações.

**Figura 2.11 – Atualizações da topografia e uso do solo - (a) configuração padrão da topografia do WRF/CHEM, (b) topografia atualizada, (c) configuração padrão do uso do solo do WRF/CHEM e (d) uso do solo atualizado.**



Fonte: Autor (2018).

### **2.2.7 Descrição das simulações e período de estudo**

As simulações foram realizadas utilizando a versão 3.9 do modelo WRF/CHEM que foi configurado para simular um período de 96 horas, ou seja, do dia 22/04/2011 00UTC até 26/04/2011 00UTC. Os dias foram escolhidos de acordo com a disponibilidade de dados coletados no respectivo período.

As emissões totais em toneladas dos poluentes CO, NO<sub>x</sub> e NMHC para o ano de 2011 foram obtidas através do inventário de emissão construído para o ano de 2016, uma vez que tal inventário explicita, em separado, as emissões totais dos anos anteriores a 2002 e de 2002 até 2016. Esse nível de detalhe permite estimar as emissões de qualquer ano anterior a 2016 e, dessa forma, não é preciso construir um novo inventário de emissão para o ano em que se quer estimar as emissões totais de CO, NO<sub>x</sub>, NMHC e MP.

### **2.2.8 Condição inicial para a química do modelo**

Como condição inicial ou concentração de fundo utilizou-se a simulação do dia 21/04/2011 que serviu para incorporar os dados da atmosfera e química antes do início da simulação do período de estudo. A concentração de fundo foi assimilada pelo modelo através de um programa escrito na linguagem de programação Fortran que foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem Atmosférica e Instrumentação Meteorológica do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Para efeito de validação das concentrações simuladas, optou-se por validar apenas as concentrações dos dias 23 a 25 de abril de 2011 de modo que o dia 22/04/2011 passou a ser utilizado também como concentração de fundo.

### **2.2.9 Análise estatística**

Os dados observados e simulados foram analisados estatisticamente através do conceito de média, desvio-padrão, erro médio, raiz do erro médio quadrático e coeficiente de correlação (tabela 2.9). A seguir estão descritos todos os parâmetros estatísticos utilizados neste trabalho.

### 2.2.9.1 Média ( $\bar{M}$ )

Seja N o número total de valores de uma amostra e  $X_i$  cada valor onde  $i = 1, \dots, N$ . A Média ( $\bar{M}$ ) é a soma dos valores  $X_i$  dividida pelo total de valores N.

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad \text{Eq. 06}$$

### 2.2.9.2 Desvio Padrão ( $\sigma$ )

É uma medida de dispersão dos dados em torno da média. Um desvio padrão baixo indica que os dados estão próximos da média, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados estão distribuídos por uma ampla gama de valores.

$$\Sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{M})^2}{N-1}} \quad \text{Eq. 07}$$

Onde  $X_i$ , N e  $\bar{M}$  são os valores, quantidade e média dos dados da amostra, respetivamente.

### 2.2.9.3 Erro Médio (EM) ou Viés

É a média das diferenças entre os valores simulados e observados. Um valor positivo indica que as simulações superestimam as observações, enquanto um valor negativo mostra que as simulações estão subestimadas em relação às observações. Um viés igual à zero indica uma simulação perfeita.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad \text{Eq. 08}$$

Onde  $S_i$  e  $O_i$  são dados simulados e observados, respectivamente e N é a quantidade total de dados.

### 2.2.9.4 Coeficiente de Correlação (r)

Mede a relação linear entre os valores simulados e observados. Pode variar de -1 a 1, onde  $r = 1$  indica uma correlação perfeita.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{Eq. 09}$$

Onde:  $S_i$  e  $O_i$  são os dados simulados e observados, respectivamente e  $N$  é a quantidade total de dados.  $\bar{S}$  e  $\bar{O}$  são as médias dos valores simulados e observados, respectivamente.

### 2.2.9.5 Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQU)

É a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre os valores simulados e observados. Quanto maior a REMQU mais alta será a discrepância entre os dados simulados e observados.

$$\text{REMQU} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:  $S_i$  e  $O_i$  são dados simulados e observados, respectivamente e  $N$  é a quantidade total de dados.

**Tabela 2.9 - Equações e indicadores para a análise estatística** - “N” representa o número total de dados,  $S_i$  os dados simulados e  $O_i$  os dados observados.

Média ( $\bar{S}$ )	$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i$	Média dos valores simulados ou observados.
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}{N - 1}}$	Variação dos dados com base na média.
Erro Médio ou Viés (EM)	$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)$	Média das diferenças, melhor próximo de zero.
Coefficiente de Correlação (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$	$r \geq 0,70$ Correlação forte; $0,30 \leq r < 0,70$ Correlação moderada; $r < 0,30$ Correlação fraca.
Raiz do Erro Médio Quadrático (REM <sub>Q</sub> )	$REM_Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	Média das diferenças quadráticas, melhor próximo de zero.

Fonte: Autor (2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Descrição das condições meteorológicas

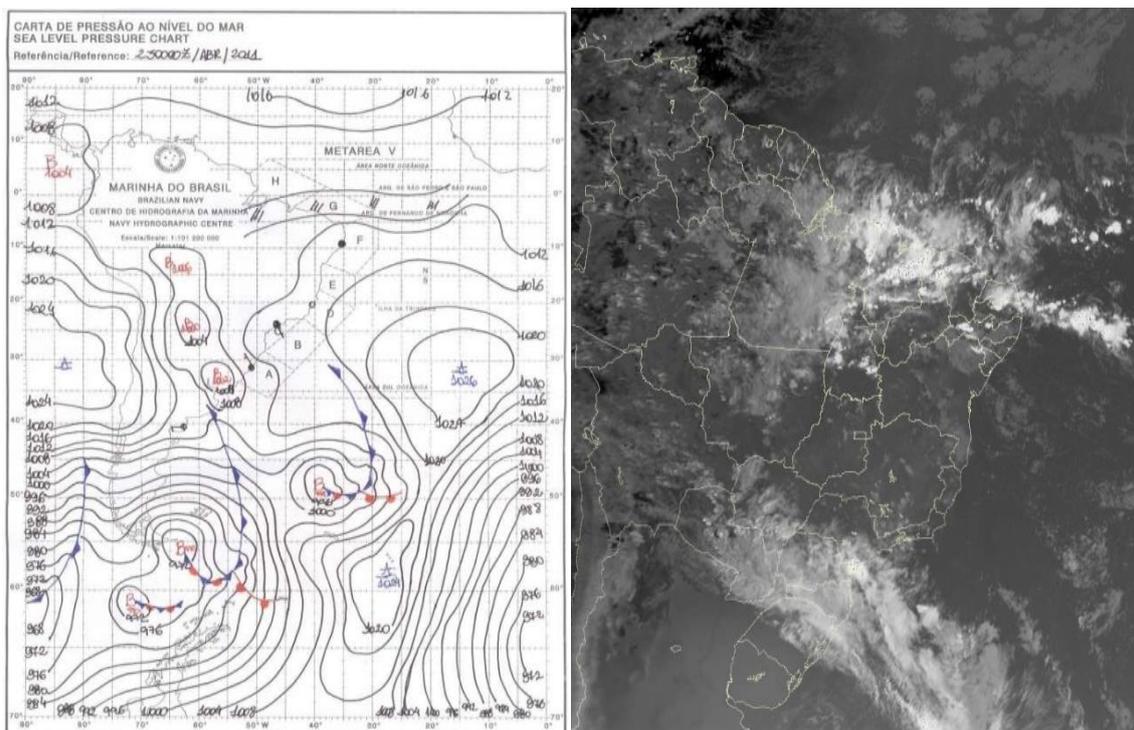
Será dada uma descrição das condições meteorológicas dos dias 23 a 25/04/2011 que foram os dias escolhidos para a realização das simulações e validações neste presente trabalho.

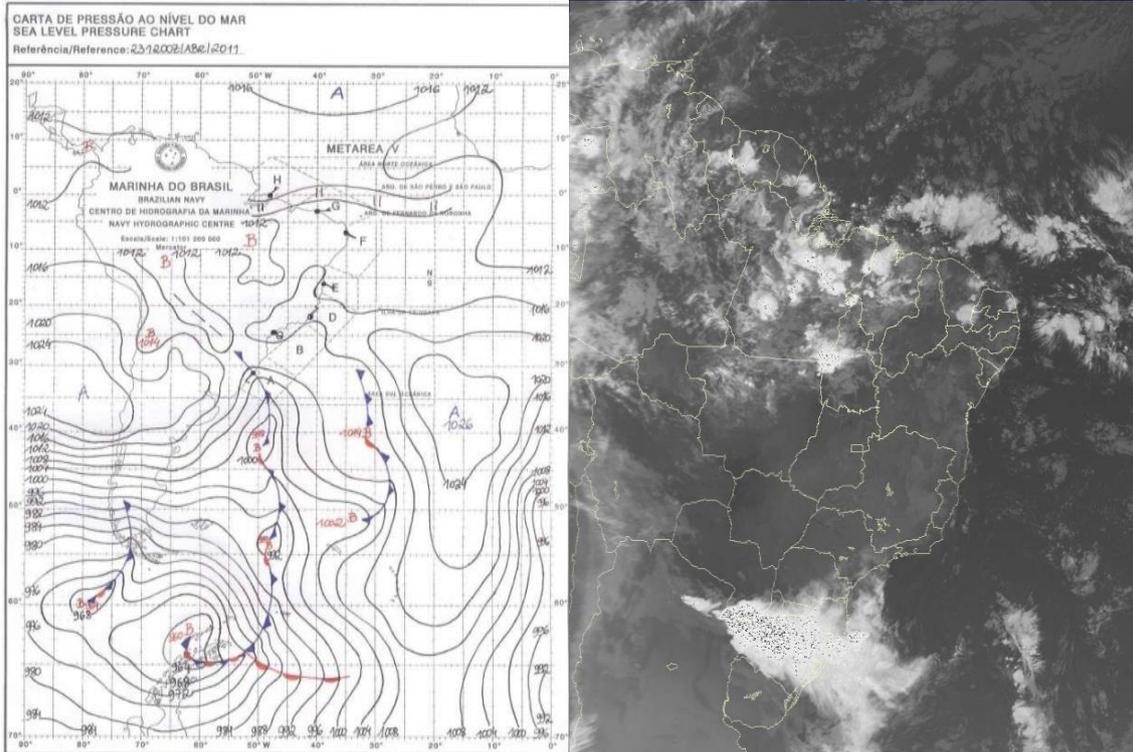
No dia 23/04/2011 observa-se que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está deslocada para uma posição mais ao sul da sua posição climatológica causando nebulosidade sobre o norte do Nordeste (figura 3.1). Nota-se que os ventos alísios de nordeste causam o deslocamento da nebulosidade associada à ZCIT em direção à região Norte do Brasil. No dia 24/04/2011 a ZCIT atua em conjunto com um centro de baixa pressão com núcleo de 1006 hpa em torno de 5°S/30°O (figura 3.2). No dia 25/05/2011 a ZCIT atua agora em conjunto com um centro de baixa pressão com núcleo de 1010 hpa em torno de 15°S/50°O causando nebulosidade na região central do Nordeste (figura 3.3).

**Figura 3.1 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 23/04/2011 as 12 e 00 UTC.**

(a) 00 UTC

(b) 00 UTC





(c) 12 UTC

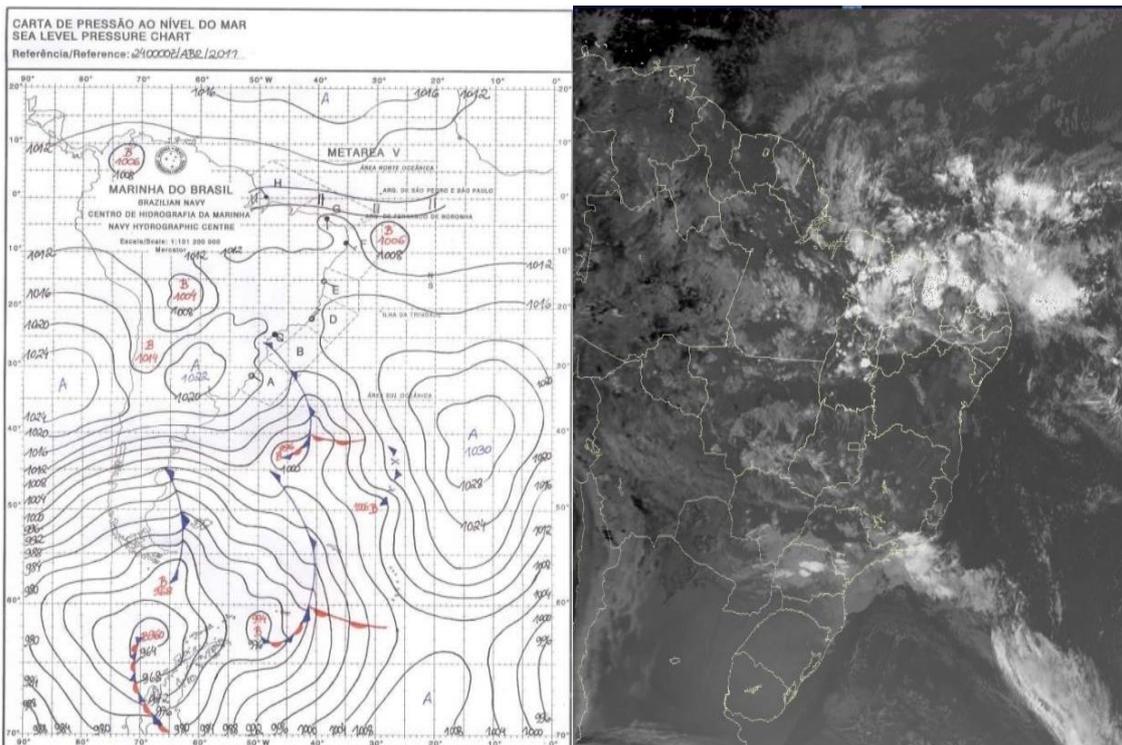
(d) 12 UTC

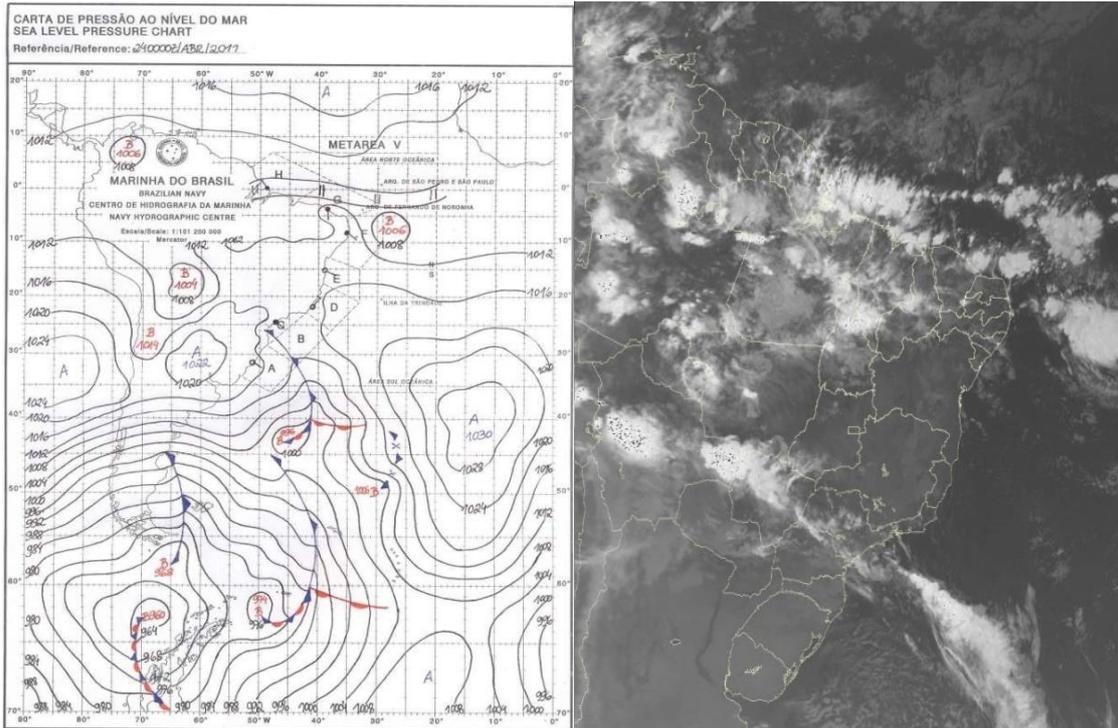
Fonte: Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN), (2011) e copyright 2010-2012 EUMETSAT.

**Figura 3.2 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 24/04/2011 as 12 e 00 UTC.**

(a) 00 UTC

(b) 00 UTC





(c) 12 UTC

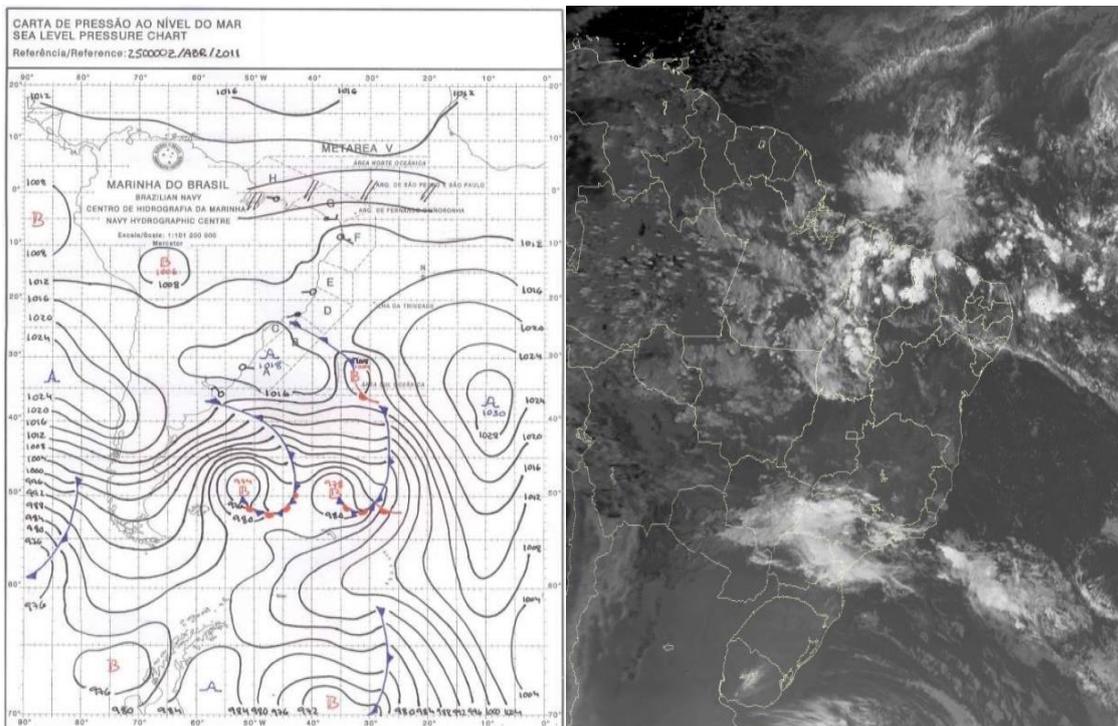
(d) 12 UTC

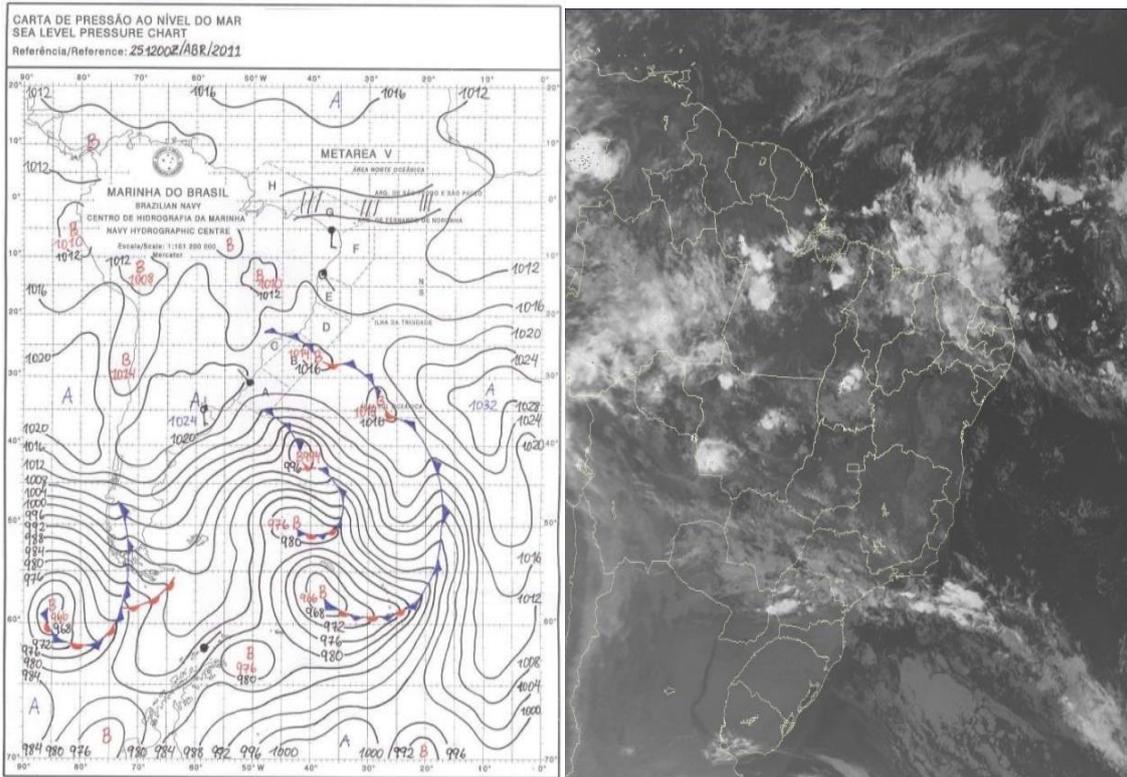
Fonte: Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN), (2011) e copyright 2010-2012 EUMETSAT.

Figura 3.3 - Cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite para o dia 25/04/2011 as 12 e 00 UTC.

(a) 00 UTC

(b) 00 UTC





(c) 12 UTC

(d) 12 UTC

Fonte: Dretoria de Hidrologia e Navegação (DHN), (2011) e copyright 2010-2012 EUMETSAT.

### 3.2 Resolução de 5 km

Esta seção mostra os resultados das simulações das variáveis meteorológicas e químicas utilizando a resolução de 5 km no modelo atmosférico WRF/CHEM.

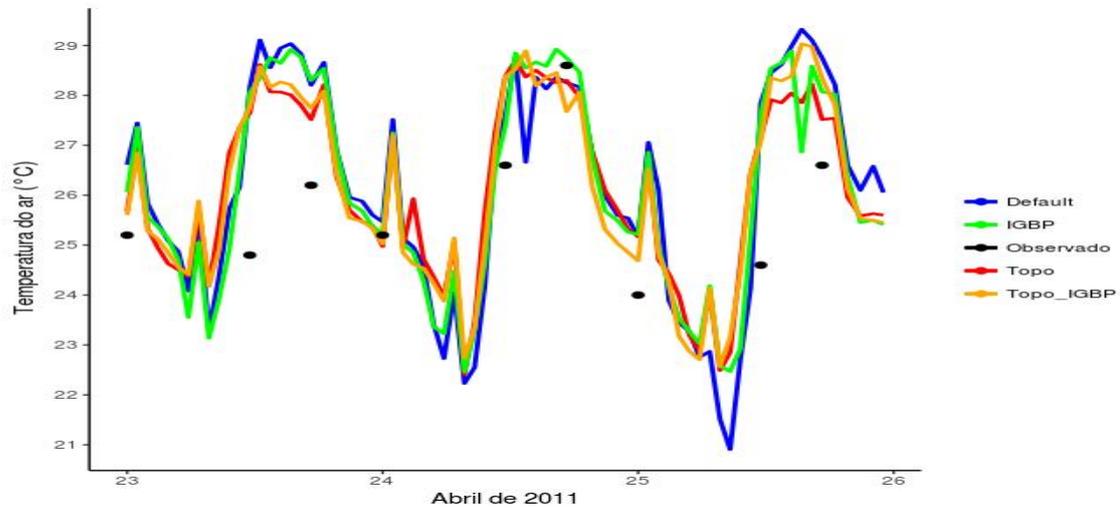
#### 3.2.1 Variáveis meteorológicas

>

##### 3.2.1.1 Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento

As figuras seguintes mostram a variação temporal da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió.

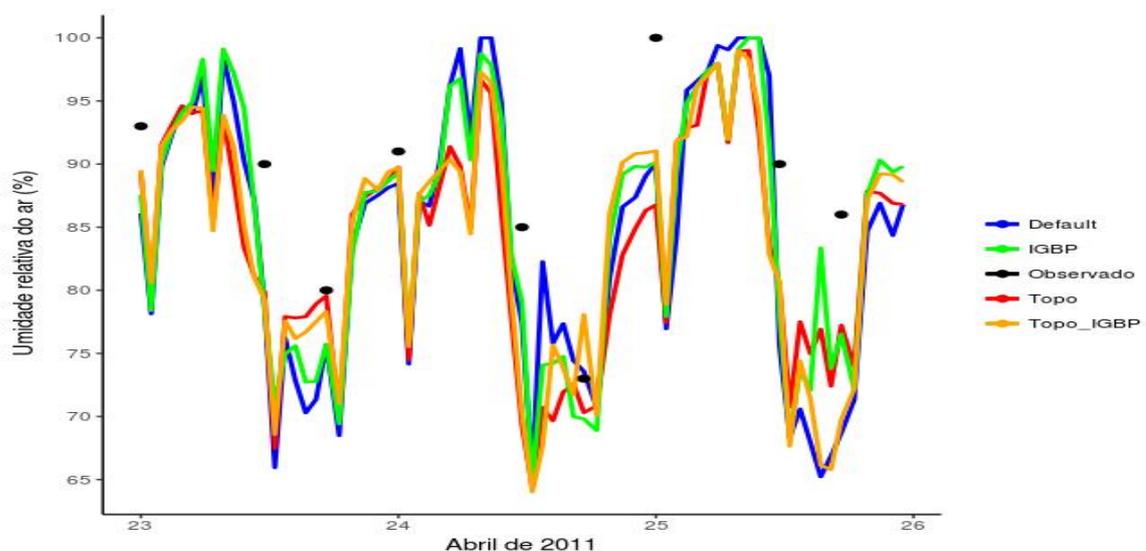
**Figura 3.4 – Temperatura do ar simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

A variabilidade horária da temperatura do ar simulada (figura 3.4) pelas quatro simulações está bastante parecida, porém Default apresenta dois valores de mínimos bem acentuados. Nota-se que todas as simulações geralmente superestimam os valores da temperatura observada nas horas 00, 12 e 18 UTC dos dias analisados.

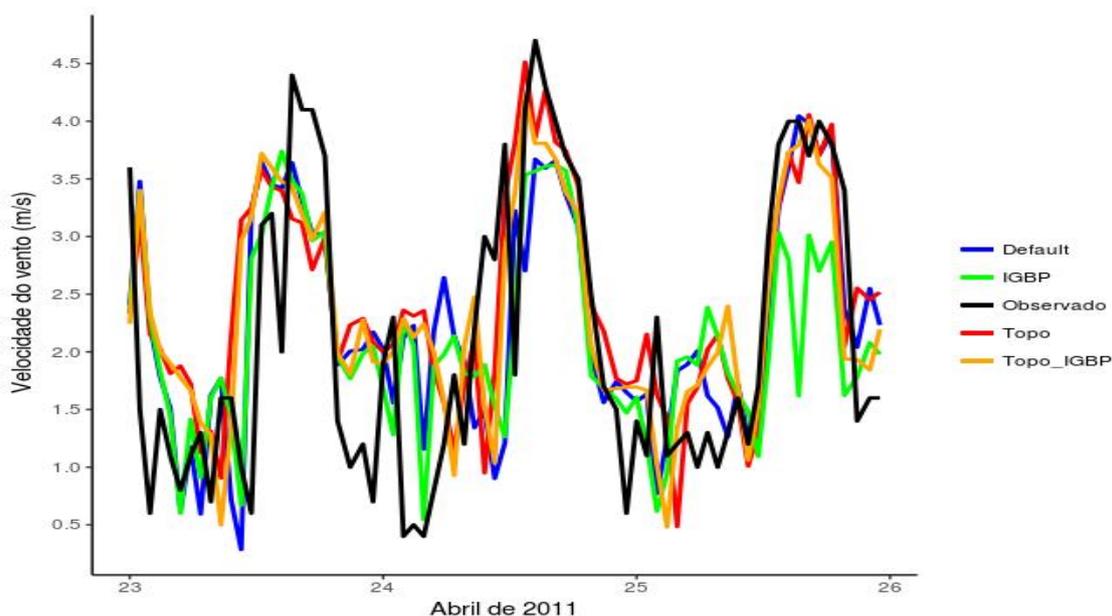
**Figura 3.5 – Umidade relativa do ar simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

A variabilidade horária da umidade relativa simulada (figura 3.5) pelas quatro simulações segue a mesma tendência, porém apresenta dois valores de máximos bem acentuados em Default e IGBP. As quatro simulações geralmente subestimam a temperatura observada nas horas 00, 12 e 18 UTC dos dias analisados.

**Figura 3.6 – Velocidade do vento simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**

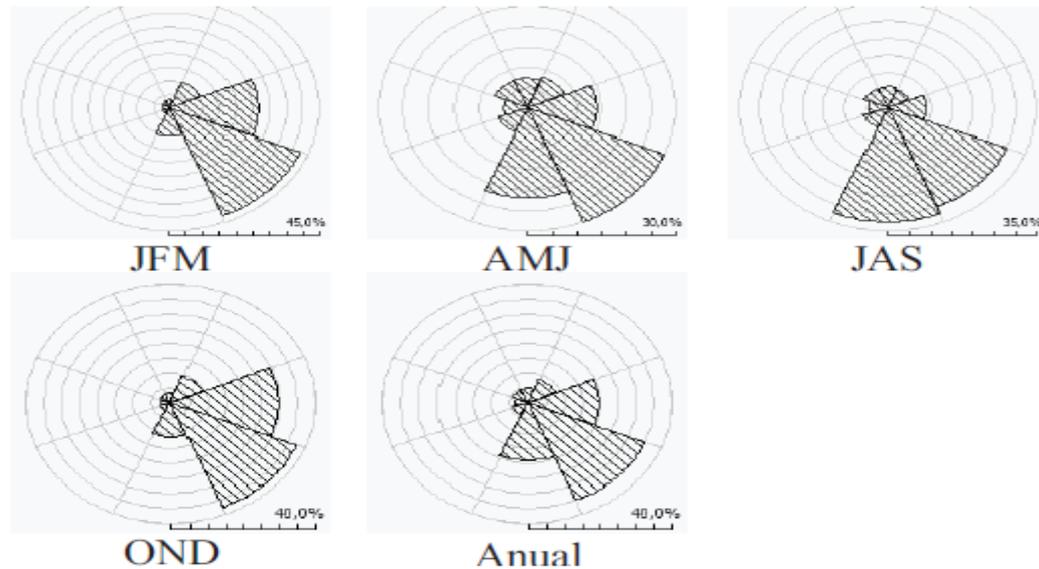


**Fonte:** Autor (2018).

A variabilidade horária da velocidade do vento simulada (figura 3.6) pelas quatro simulações, em geral, segue a mesma tendência da velocidade do vento observada, porém apresentando em algumas horas uma variabilidade bem discrepante em relação às observações.

Correia Filho e Aragão (2010) realizaram um estudo para o ano de 1999 sobre a direção do vento predominante na cidade de Maceió-AL. Este estudo analisou a direção do vento em quatro trimestres do ano: Janeiro-Fevereiro-Março (JFM), Abril-Maio-Junho (AMJ), Julho-Agosto-Setembro (JAS) e Outubro-Novembro-Dezembro (OND). Os resultados obtidos indicaram que a direção predominante foi de sudeste ( $135^\circ$ ) correspondendo a 30% da frequência anual com exceção do trimestre JAS em que a direção sul ( $180^\circ$ ) predominou em relação às outras. Veja a figura 3.7 abaixo.

**Figura 3.7 – Variação percentual trimestral da direção do vento no Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares gerada pelo programa WASP para o ano de 1999 - A rosa dos ventos está dividida em oito setores de 45°. O intervalo da escala das circunferências é de 5%.**



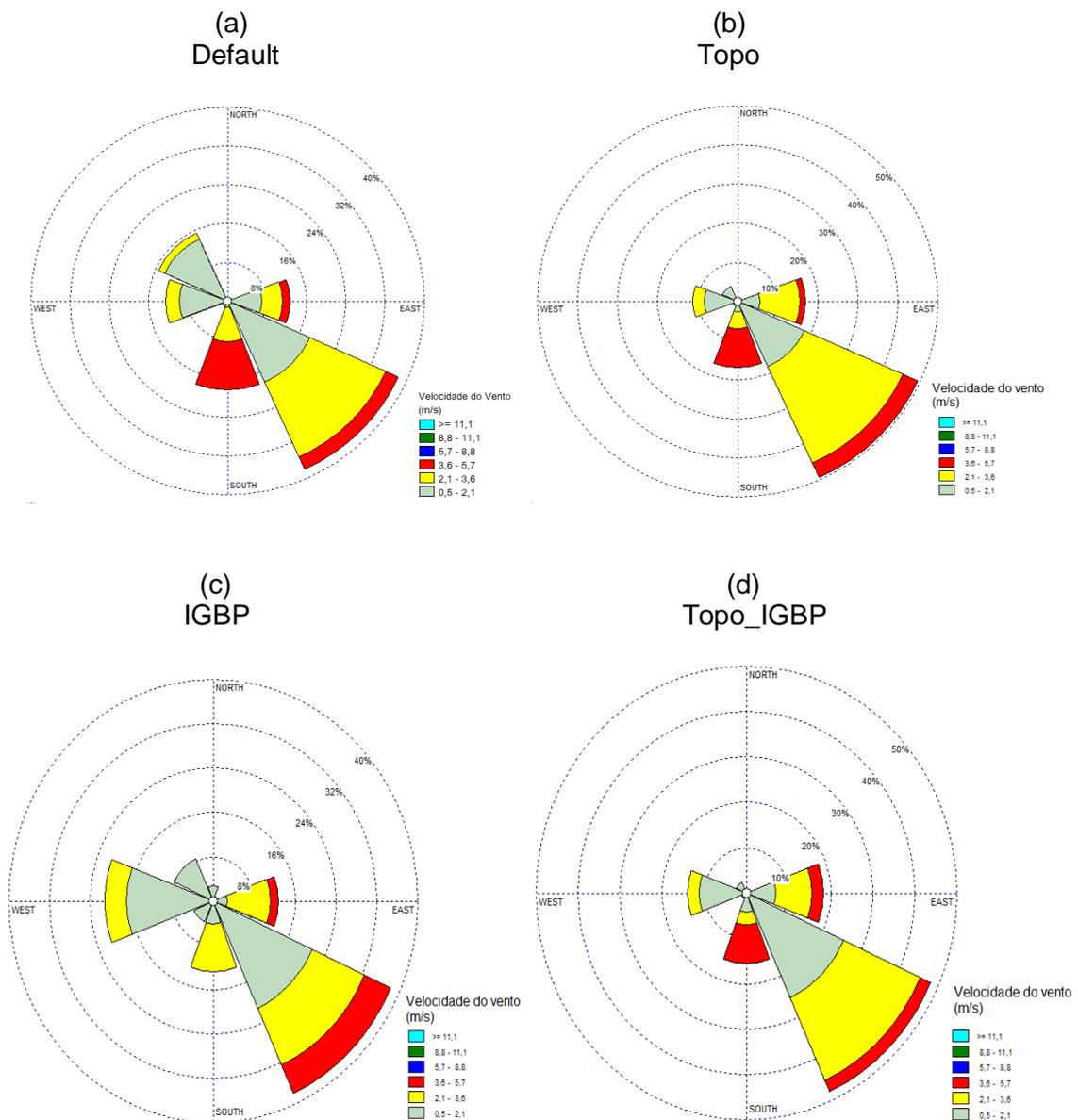
**Fonte:** Correia Filho e Aragão, (2010).

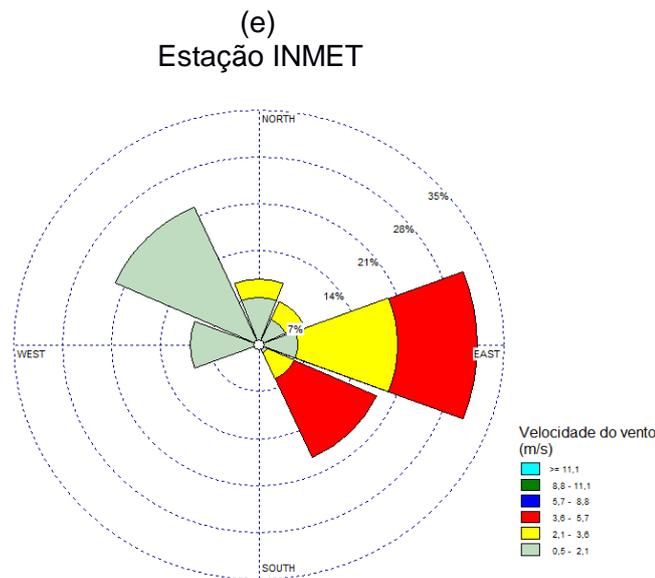
Bernardo e Molion (2000) estudaram a variabilidade da direção e velocidade do vento na cidade de Maceió-AL durante os anos de 1991-1996. Os resultados mostraram que durante o período chuvoso (Abril-Julho) a direção preferencial do vento durante o período diurno foi de sul-sudeste (SSE), apresentando também as direções sul (S) e sul-sudoeste (SSW) e as velocidades horárias médias em torno de 4-4,5 m/s. Durante a noite a direção predominante foi de norte (N) e velocidades médias aproximadas de 0-1 m/s. Os autores também analisaram a intensidade e direção do vento para três diferentes períodos do ciclo anual, designados da seguinte forma: dezembro-março, abril-julho e agosto-novembro. Eles concluíram que durante o período abril-julho as velocidades máximas do vento encontradas foram inferiores a 4 m/s entre 13 e 15 horas enquanto que durante a noite os mínimos não excederam os 0,5 m/s.

A figura 3.8 mostra as rosas dos ventos construídas para as simulações da velocidade e direção do vento para as quatro simulações executadas no modelo WRF/CHEM. A direção predominante do vento foi de sudeste com velocidades máximas diurnas entre 13 e 17 horas inferiores a 4,6 m/s e velocidades mínimas noturnas superiores a 0,4 m/s. Tais resultados encontrados estão de acordo com Correia Filho e Aragão (2010) (ver figura 3.7 e

nomenclatura AMJ) e Bernardo e Molion (2000). A velocidade média diurna foi de 2,7 m/s, enquanto a noturna ficou em torno de 1,8 m/s que também não estão muito discrepantes ao observado em Bernardo e Molion (2000).

**Figura 3.8 – Variação percentual da direção do vento simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - Rosas dos ventos dividida em quatro setores de 45°.**





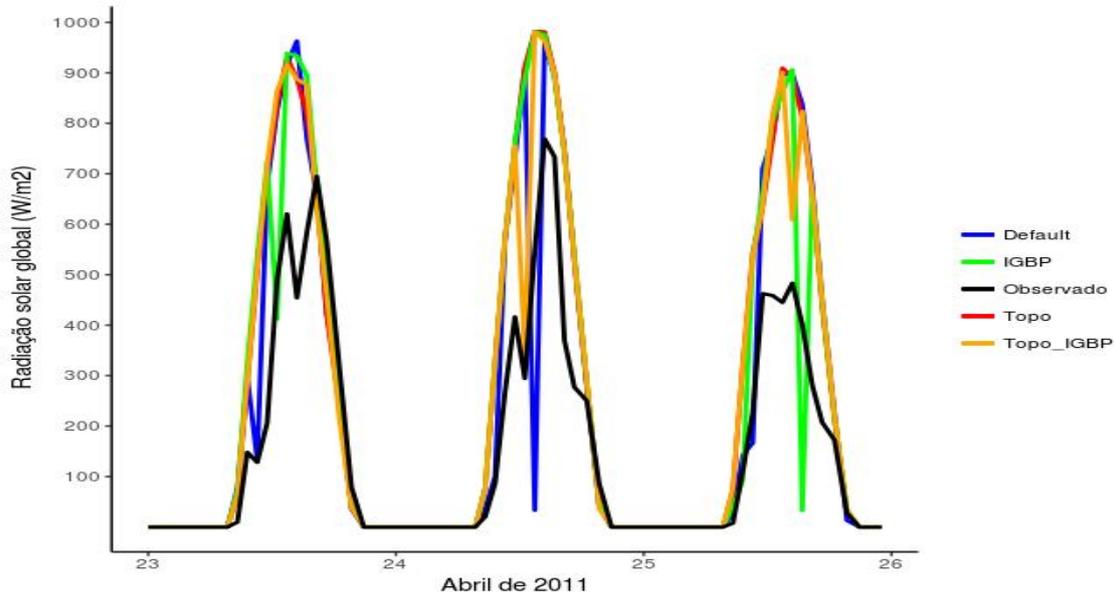
Fonte: Autor (2018).

As circulações de brisa da Costa Leste do Nordeste estão imersas no campo dos ventos alísios de sudeste, que é resultante da circulação geral da atmosfera. A brisa marítima (dia) torna-se mais intensa quando sua intensidade é somada a dos ventos alísios. A intensidade da brisa terrestre (noite) é menos intensa porque se opõe a direção dos ventos alísios, porém por volta de 5 a 7 horas da manhã atinge sua intensidade máxima (Bernardo e Molion, 2000). Nota-se, na figura 3.8, que o modelo WRF/CHEM conseguiu representar a formação de brisas nas quatro simulações realizadas, o que está de acordo com as medições realizadas pela estação automática do INMET que também detectou a formação de brisas durante o período estudado.

### 3.2.1.2 Altura da camada limite planetária (CLP) e radiação solar global

Conforme pode ser visto na figura 3.9 as séries temporais de radiação solar global seguem um padrão normal com máximos de aproximadamente  $950 \text{ W/m}^2$ , mas com discrepâncias entre as curvas por conta de formação de nuvens. As simulações Default e Topo\_IGBP apresentaram grandes discrepâncias no dia 24/04 e a simulação IGBP no dia 25/04. Pode-se observar ainda que a simulação Topo não simulou a influência de nebulosidade para o período considerado.

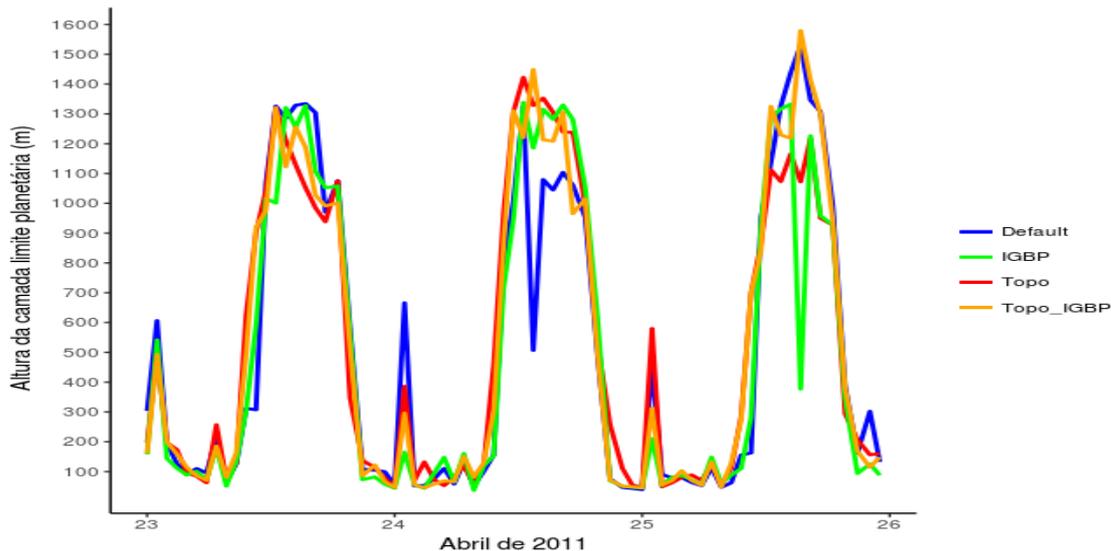
**Figura 3.9 – Incidência de radiação solar global simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



**Fonte:** Autor (2018).

Nota-se que as séries temporais da altura da CLP (figura 3.10) têm uma variabilidade similar, com exceção de dois valores diurnos bem acentuados verificados nas simulações Default e IGBP do modelo WRF/CHEM. Em relação à simulação Default ocorreu um valor de aproximadamente 507 m da altura da CLP às 14 UTC do dia 24/04/2011 associada à quantidade de radiação recebida de 33 W/m<sup>2</sup> no horário analisado. Na simulação IGBP percebe-se uma altura da CLP aproximada de 377 m às 16 UTC do dia 25/04/2011 associada também à quantidade radiação solar incidente de 33 W/m<sup>2</sup> no respectivo horário.

**Figura 3.10 – Altura da camada limite planetária simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações realizadas do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

### 3.2.1.3 Análise estatística

Os índices estatísticos para a temperatura simulada diferem entre si no máximo em  $0,42\text{ }^{\circ}\text{C}$  para as médias,  $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  para os desvios-padrões,  $0,42\text{ }^{\circ}\text{C}$  para os erros médios,  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  para os *REMQ* e  $0,1$  para os coeficientes de correlação, conforme apresentado na tabela 3.1. Em relação à média e o desvio-padrão da temperatura observada, as temperaturas simuladas diferiram no máximo em  $1,58\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Os erros médios positivos indicam que os dados simulados geralmente superestimam as observações, porém um *REMQ* máximo de  $1,97\text{ }^{\circ}\text{C}$  mostra que o simulado está próximo do observado. Os coeficientes de correlação ficaram entre  $0,5$  e  $0,7$  indicando em que em termos de fase o modelo representou razoavelmente às observações. Vela (2013) e Rojas (2013) encontraram coeficientes de correlação, em geral, maiores que  $0,7$  nas várias estações de medição quando o modelo WRF/CHEM foi executado com a atualização da topografia. Na simulação Topo, o presente trabalho encontrou um coeficiente de correlação de  $0,67$  indicando que tal resultado está em concordância com os dois autores citados.

Os índices estatísticos para a umidade relativa simulada diferem entre si no máximo em  $1,35\%$  para as médias,  $1,04\%$  para os desvios-padrões,  $1,35\%$  para os erros médios,  $1,87\%$

para os *REMQ* e 0,26 para os coeficientes de correlação, de acordo com a tabela 3.1. Em relação à média e o desvio-padrão da umidade relativa observada, as umidades relativas simuladas diferiram no máximo em 8,17% e 0,86%, respectivamente. Os erros médios negativos indicam que os dados simulados geralmente subestimam as observações, porém um *REMQ* máximo de 9,77 mostra que o simulado não está muito discrepante do observado. A simulação Topo\_IGBP apresentou o menor coeficiente de correlação, em torno de 0,6, mostrando que a variabilidade horária da umidade relativa foi razoavelmente simulada, enquanto as outras simulações (default, Topo e IGBP) apresentaram coeficientes de correlação entre 0,7 e 0,9. Os coeficientes de correlação obtidos por Rojas (2013) para a umidade relativa foram, em geral, menores do que os da temperatura, porém o presente trabalho obteve, em geral, coeficientes de correlação maiores do que os da temperatura simulada.

A simulação IGBP obteve a melhor acurácia para a velocidade do vento simulada, apresentando média dos dados simulados bem próxima da média observada e menor erro médio, enquanto a simulação Topo apresentou a menor acurácia uma vez que a média dos dados simulados ficou mais distante da média das observações e maior erro médio.

**Tabela 3.1 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para a resolução de 5 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\bar{M}_{sim}$  são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os  $\sigma_{obs}$  e  $\sigma_{sim}$  são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O  $r$  é o coeficiente de correlação,  $EM$  é o erro médio e  $REMQ$  é a raiz do erro médio quadrático.**

Índice estatístico	Variáveis Meteorológicas											
	Temperatura do ar (°C)				Umidade relativa do ar (%)				Velocidade do vento (m/s)			
	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP
$\bar{M}_{sim}$	27,34	26,93	27,19	26,92	79,39	80,28	80,5	80,74	2,22	2,42	2,1	2,33
$\bar{M}_{obs}$	25,76	25,76	25,76	25,76	87,56	87,56	87,56	87,56	2,12	2,12	2,12	2,12
$\sigma_{sim}$	1,29	1,31	1,34	1,43	7,26	7,46	6,94	7,98	0,96	0,92	0,82	0,92
$\sigma_{obs}$	1,4	1,4	1,4	1,4	7,8	7,8	7,8	7,8	1,26	1,26	1,26	1,26
$r$	0,57	0,67	0,64	0,6	0,72	0,74	0,87	0,61	0,64	0,67	0,62	0,67
$EM$	1,59	1,17	1,43	1,17	-8,17	-7,27	-7,05	-6,82	0,1	0,3	-0,01	0,21
$REMQ$	1,97	1,57	1,8	1,67	9,77	8,92	7,9	9,46	0,97	0,98	0,99	0,96

Fonte: Autor (2018).

As simulações para a temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram classificadas da seguinte forma, de acordo com a acurácia dos resultados:

**Tabela 3.2 – Classificação das simulações (resolução de 5 km) Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP de acordo com a acurácia dos resultados simulados em relação aos dados observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.**

Classificação	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)
	Simulação	Simulação	Simulação
1.	Topo ( $REM_Q = 1,57$ )	IGBP ( $REM_Q = 7,9$ )	IGBP
2.	Topo_GBP ( $REM_Q = 1,67$ )	Topo ( $REM_Q = 8,92$ )	Topo_GBP
3.	IGBP ( $REM_Q = 1,8$ )	Topo_IGBP ( $REM_Q = 9,46$ )	Default
4.	Default ( $REM_Q = 1,97$ )	Default ( $REM_Q = 9,77$ )	Topo

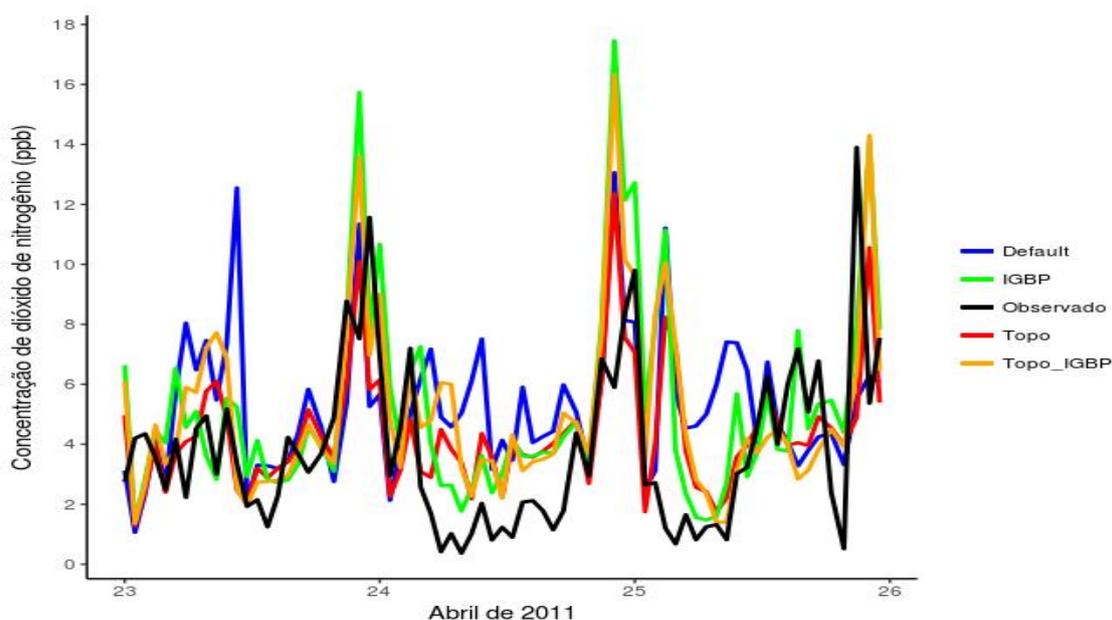
Fonte: Autor (2018).

### 3.2.2 Variáveis químicas

#### 3.2.2.1 Dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

A análise visual da figura 3.11 mostra que os resultados da simulação Default para as concentrações de NO<sub>2</sub> (linha azul) estão mais discrepantes em relação aos dados observados (linha preta) do que os dados simulados pelas outras três simulações restantes (Topo, IGBP e Topo\_IGBP). Será feita uma análise detalhada dos erros e acertos dos resultados do WRF/CHEM para as simulações Default e Topo. As análises das simulações IGBP e Topo\_IGBP restantes são similares.

**Figura 3.11 – Concentração de NO<sub>2</sub> simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



**Fonte:** Autor (2018).

Primeiramente, começaremos pela análise da simulação Default (linha azul). Neste caso, o WRF/CHEM simulou uma altitude de 3,4 m do local de medição. A categoria de uso do solo igual a 13 foi à obtida para as quatro simulações, ou seja, área urbana.

O mínimo noturno simulado (1 ppb à 01 UTC) do dia 23/04/2011 está subestimado em relação ao observado (2 ppb às 06 UTC). O máximo noturno simulado (11,5 ppb às 22 UTC) está próximo do observado (12 ppb às 23 UTC), porém foi adiantado em uma hora. O mínimo diurno simulado (2 ppb às 12 UTC) está superestimado em relação ao observado (1,5 ppb às

14 UTC) . O máximo diurno simulado (12,5 ppb às 11 UTC) foi atrasado em uma hora em relação ao observado (5 ppb às 10 UTC) e está superestimado.

O mínimo noturno simulado (2 ppb à 01 UTC) do dia 24/04/2011 está superestimado em relação ao observado (0,5 ppb às 08 UTC). O máximo noturno simulado (13 ppb às 22 UTC) foi adiantado uma hora em relação ao observado (8,5 ppb às 23 UTC). O mínimo diurno simulado (3 ppb às 11 UTC) foi bem representado, porém está superestimado em relação as observações (1 ppb às 11 UTC). O máximo diurno simulado (7,5 ppb às 10 UTC) ocorreu em uma hora diferente da observada (4,5 ppb às 19 UTC).

O mínimo noturno simulado (2,5 ppb à 01 UTC) do dia 25/04/2011 ocorreu em uma hora diferente da observada ( 1 ppb às 04 UTC). O máximo noturno simulado (8 ppb) ocorreu às 00 UTC enquanto nas observações (14 ppb ) ocorreu às 21 UTC. O mínimo diurno simulado (3,5 ppb às 16 UTC) está superestimado em relação ao observado (0,5 ppb às 20 UTC ). O máximo diurno simulado (7,5 ppb às 9 UTC) está próximo do observado ( 7 ppb às 16 UTC), porém ocorreu em um horário diferente.

Percebe-se que todos os mínimos noturnos ocorreram a 01 UTC porque nesse horário a altura média da CLP para os três dias simulados foi de aproximadamente 576 m e velocidade média do vento de 2,2 m/s, o que favoreceu o processo de dispersão. Os máximos noturnos para os dias 23 e 24/2011 ocorreram às 22 UTC, uma vez que nessa hora a altura média da CLP para os dois dias foi de aproximadamente 76 m e velocidade do vento média aproximada de 2 m/s, ou seja, a baixa altura da CLP não permitiu a dispersão de NO<sub>2</sub>. O máximo noturno verificado a 00 UTC do dia 25/04/2011 ocorreu porque nesse horário a altura da CLP estava em 40 m e a velocidade do vento em 1,6 m/s. O mínimo diurno verificado no dia 23/04 às 12 UTC, possivelmente, ocorreu pela grande altura da CLP que atingiu mais de 1 km em virtude da grande incidência de radiação solar e também por ventos com velocidades aproximadas de 3 m/s, o que favoreceu a dispersão e difusão de NO<sub>2</sub>. O mínimo diurno do dia 24/04/2011 ocorreu às 11 UTC por maior influência, possivelmente, das reações fotoquímicas de produção e perda de NO<sub>2</sub> que causaram sua difusão uma vez que altura da CLP atingiu quase 800 m, porém a velocidade do vento nesse horário não ultrapassou 1 m/s. O mínimo diurno do dia 25/04/2011 ocorreu às 16 UTC porque a altura da CLP atingiu mais de 1,5 km e velocidade do vento em torno de 4 m/s favorecendo tanto a difusão como a dispersão de NO<sub>2</sub> . Os máximos diurnos ocorreram entre 9 e 11 UTC, horários em que a altura média da CLP foi pequena, em torno de 175 m, e velocidade média do vento de 1 m/s, ou seja, condições que não favorecem a dispersão e também a difusão de NO<sub>2</sub>.

Para a simulação Topo a uma altitude simulada de 54 m, o mínimo noturno simulado (1,5 ppb à 01 UTC) do dia 23/04/2011 está subestimado em relação ao observado (2 ppb às 06 UTC). O máximo noturno simulado (10 ppb às 22 UTC) ocorreu uma hora antes do observado (12 ppb às 23 UTC). O mínimo diurno simulado (2 ppb às 12 UTC) está superestimado em relação ao observado (1,5 ppb às 14 UTC). O máximo diurno simulado (6 ppb às 9 UTC) foi adiantado em uma hora em relação ao observado (5 ppb às 10 UTC) e está superestimado.

O mínimo noturno simulado (2,5 ppb à 01 UTC) do dia 24/04/2011 está superestimado em relação ao observado (0,5 ppb às 08 UTC). O máximo noturno simulado (12,5 ppb às 22 UTC) foi adiantado em hora em relação ao observado (8,5 ppb às 23 UTC). O mínimo diurno simulado (2 ppb 09 UTC) ocorreu em horário diferente do observado (1 ppb às 11 UTC) e está superestimado. O máximo diurno simulado (5 ppb às 19 UTC) foi bem representado e está próximo do observado (4,5 ppb às 19 UTC).

O mínimo noturno simulado (2 ppb às 01 UTC) do dia 25/04/2011 está superestimado em relação ao observado (1 ppb às 04 UTC). O máximo noturno simulado (11 ppb às 22 UTC) foi atrasado em uma hora (14 ppb às 21 UTC). O mínimo diurno simulado (2 ppb às 9 UTC) ocorreu em um horário diferente do observado (0,5 ppb às 20 UTC). O máximo diurno simulado (6 ppb às 13 UTC) está subestimado em relação as observações (7 ppb às 16 UTC).

Assim, como na simulação Default, todos os mínimos noturnos obtidos pela simulação Topo ocorreram à 01 UTC porque nesse horário a altura média da CLP atingiu 485 m e a velocidade média do vento atingiu o valor de 2,5 m/s, o que favoreceu a dispersão. Todos os máximos noturnos também foram verificados às 22 UTC, possivelmente pela baixa altura média da CLP de aproximadamente 130 m aliada com uma velocidade média do vento de um pouco mais de 2 m/s. O mínimo diurno do dia 23/04/2011 ocorreu às 12 UTC associado a uma altura da CLP de mais de 1 km e ventos mais fortes de mais de 3 m/s, enquanto o mínimos dos dias 24 e 25/04/2011 ocorreram às 09 UTC apesar da altura média da CLP de um pouco mais de 118 m e ventos com velocidade média aproximada de 2 m/s levando a crer que a maior parte do NO<sub>2</sub> noturno foi consumido por reações químicas que causam sua diluição. O máximo diurno às 09 UTC do dia 23/04/2011 associa-se a uma altura da CLP de aproximadamente 130 m e ventos fracos que não ultrapassaram 1 m/s. Os máximos diurnos às 19 UTC do dia 24/04/2011 e às 13 UTC do dia 25/04/2011 estão associados a uma intensa atividade fotoquímica de produção e perda de NO<sub>2</sub> uma vez a altura média da CLP chegou a mais de um 1 km. A velocidade média do vento ultrapassou 3 m/s, porém mesmo assim as concentrações chegaram no nível máximo.

### 3.2.2.1.1 Análise estatística

Os índices estatísticos para a concentração de  $\text{NO}_2$  simulada diferem entre si no máximo em 0,91 ppb para as médias, 1,3 ppb para os desvios-padrões, 0,91 ppb para os erros médios, 0,93 ppb para o *REMQ* e 0,4 para os coeficientes de correlação (tabela 3.3). Em relação à média e o desvio-padrão da concentração de  $\text{NO}_2$  observada, as concentrações de  $\text{NO}_2$  simuladas diferiram no máximo em 1,52 ppb e 0,74 ppb, respectivamente. Os erros médios positivos indicam que os dados simulados geralmente superestimam as observações, porém um *REMQ* máximo de 3,54 ppb mostra que o simulado não está muito discrepante do observado. O coeficiente de correlação de 0,45 obtido pela simulação Topo está de acordo com Vela (2013) que encontrou coeficientes de correlação menores que 0,6 nas várias estações de medição de  $\text{NO}_x$  enquanto o coeficiente de correlação de 0,59 obtido pela simulação IGBP está de acordo com Kuit et al. (2016) que encontraram um coeficiente de correlação máximo de 0,68 entre as várias estações de medida de  $\text{NO}_x$  na região de Berlin.

Portanto, as simulações foram classificadas seguinte forma, de acordo com o *REMQ*:

1. Topo (*REMQ* = 2,61);
2. Topo \_IGBP (*REMQ* = 3,12);
3. IGBP (*REMQ* = 3,22);
4. Default (*REMQ* = 3,54).

**Tabela 3.3 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Ozônio (O<sub>3</sub>) e Monóxido de carbono (CO) para a resolução de 5 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\bar{M}_{sim}$  são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os  $\sigma_{obs}$  e  $\sigma_{sim}$  são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O  $r$  é o coeficiente de correlação,  $EM$  é o erro médio,  $REM_Q$  é a raiz do erro médio quadrático, ppb (partes por bilhão) e ppm (partes por milhão).**

Índice estatístico	Variáveis químicas											
	Dióxido de nitrogênio (ppb)				Ozônio (ppb)				Monóxido de carbono (ppm)			
	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP
$\bar{M}_{sim}$	5,26	4,35	5,2	5,01	35,69	30,05	31,33	29,83	0,11	0,11	0,12	0,12
$\bar{M}_{obs}$	3,74	3,74	3,74	3,74	-	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma_{sim}$	2,31	2,0	3,3	2,91	6,31	2,38	5,87	2,49	0,02	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{obs}$	2,74	2,74	2,74	2,74	-	-	-	-	-	-	-	-
$r$	0,19	0,45	0,59	0,44	-	-	-	-	-	-	-	-
$EM$	1,52	0,61	1,45	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
$REM_Q$	3,54	2,61	3,12	3,22	-	-	-	-	-	-	-	-

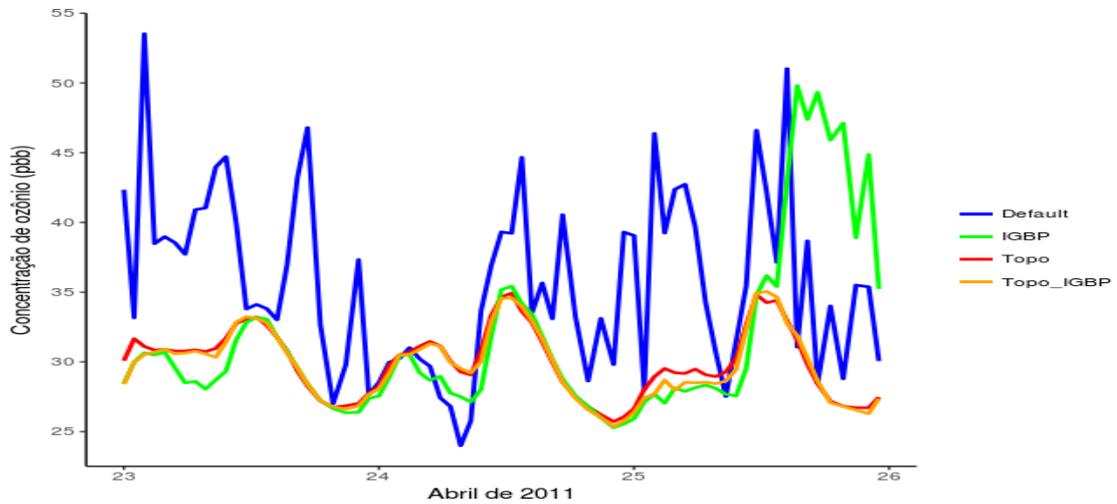
Fonte: Autor (2018).

### 3.2.2.2 Ozônio (O<sub>3</sub>)

A análise da figura 3.12 mostra que as concentrações de ozônio simuladas para as simulações Topo, IGBP e Topo\_IGBP do modelo estão próximas, exceto em algumas horas do dia 25/04 onde a simulação IGBP (linha verde) apresentou valores muito discrepantes a partir das 15 UTC. Das 15 às 20 UTC a altura média da CLP para as simulações Topo, IGBP e Topo\_IGBP atingiram valores aproximados de 938 m, 861 m e 1140 m, respectivamente. Ressaltando que a altura média para a CLP da simulação IGBP não foi maior porque a altura da CLP às 16 UTC atingiu 377 m, o que claramente influenciou na alta concentração de NO<sub>2</sub> verificada nesse horário. Portanto, a influência maior que fez com que as concentrações obtidas pela simulação IGBP ficassem superestimadas em relação às simulações Topo e Topo\_IGBP se deu pela menor velocidade do vento que atingiu uma velocidade média de 2,5 m/s, enquanto que em Topo e Topo\_IGBP a velocidade média do vento atingiu em torno de 3,5 m/s. Das 21 às 23 UTC a altura média da CLP para as simulações Topo, IGBP e Topo\_IGBP atingiram valores aproximados de 175 m, 103 m e 144 m, respectivamente, enquanto que a velocidade média do vento foi de 2,5 m/s para IGBP e de 2 m/s para Topo e Topo\_IGBP. Portanto, a altura menor da CLP e uma baixa velocidade média do vento obtidas em IGBP dificultaram a dispersão de ozônio.

Em relação às concentrações de ozônio obtidas na simulação Default, nota-se que elas estão muito discrepantes (figura 3.12) em relação às outras três simulações (Default, IGBP e Topo\_IGBP), pois apresenta a maior média e o maior desvio-padrão (tabela 3.3).

**Figura 3.12 – Concentração de O<sub>3</sub> simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**

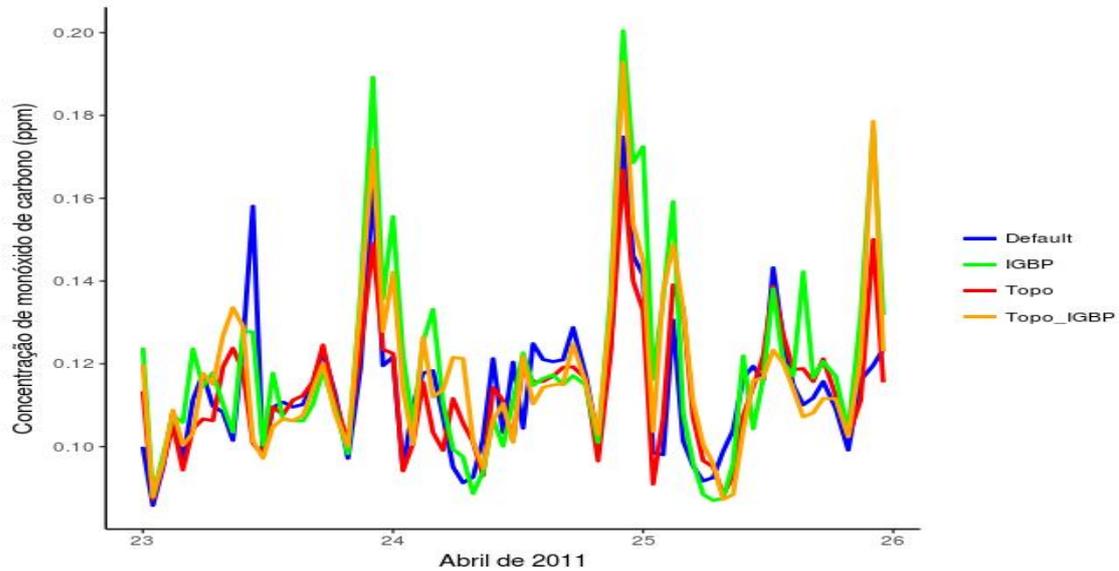


**Fonte:** Autor (2018).

### 3.2.2.3 Monóxido de carbono (CO)

As concentrações de monóxido de carbono não apresentaram variações significativas de concentrações nas quatro simulações realizadas (figura 3.13), o que já era esperado uma vez que o monóxido de carbono é um poluente pouco reativo na atmosfera. Pode-se ver na tabela 3.3 que as médias estão praticamente iguais enquanto os desvios padrões estão todos iguais.

**Figura 3.13 – Concentração de monóxido de carbono simulada com a resolução de 5 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

### 3.3 Resolução de 1 km

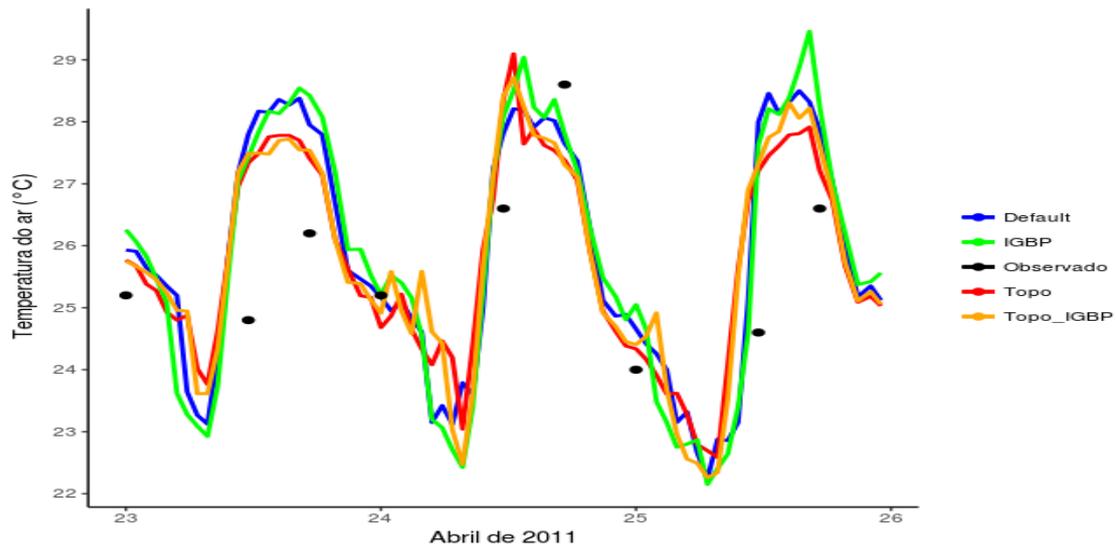
Esta seção mostra os resultados das simulações das variáveis meteorológicas e químicas utilizando a resolução de 1 km no modelo atmosférico WRF/CHEM.

#### 3.3.1 Variáveis meteorológicas

##### 3.3.1.1 Temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento

As figuras seguintes mostram a variação temporal da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió.

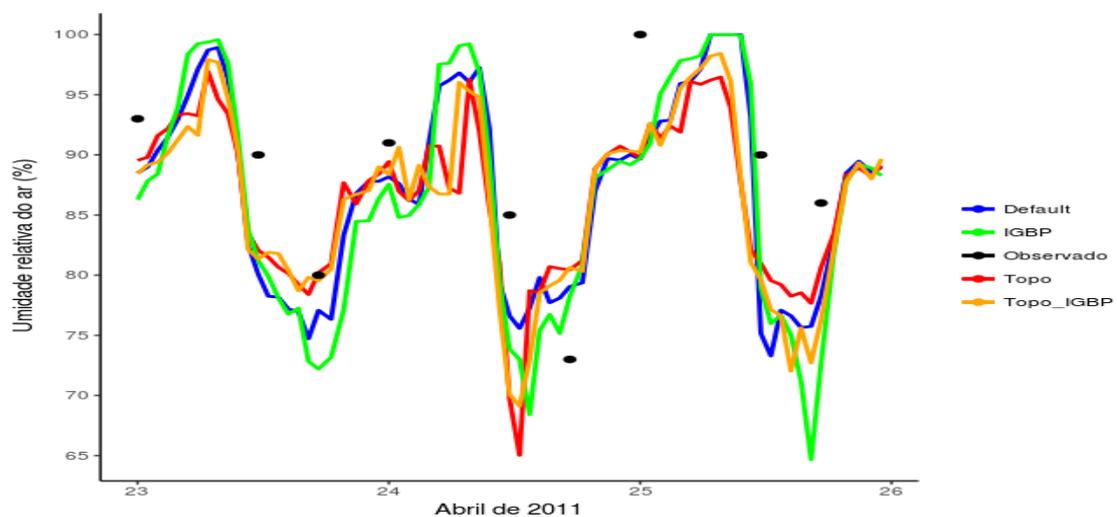
**Figura 3.14 – Temperatura do ar simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



**Fonte:** Autor (2018).

A variabilidade horária da temperatura do ar simulada (figura 3.14) pelas quatro simulações está bastante parecida, porém IGBP apresenta um máximo bem acentuado. Nota-se que todas as simulações geralmente superestimam os valores da temperatura observada nas horas 00, 12 e 18 UTC dos dias analisados.

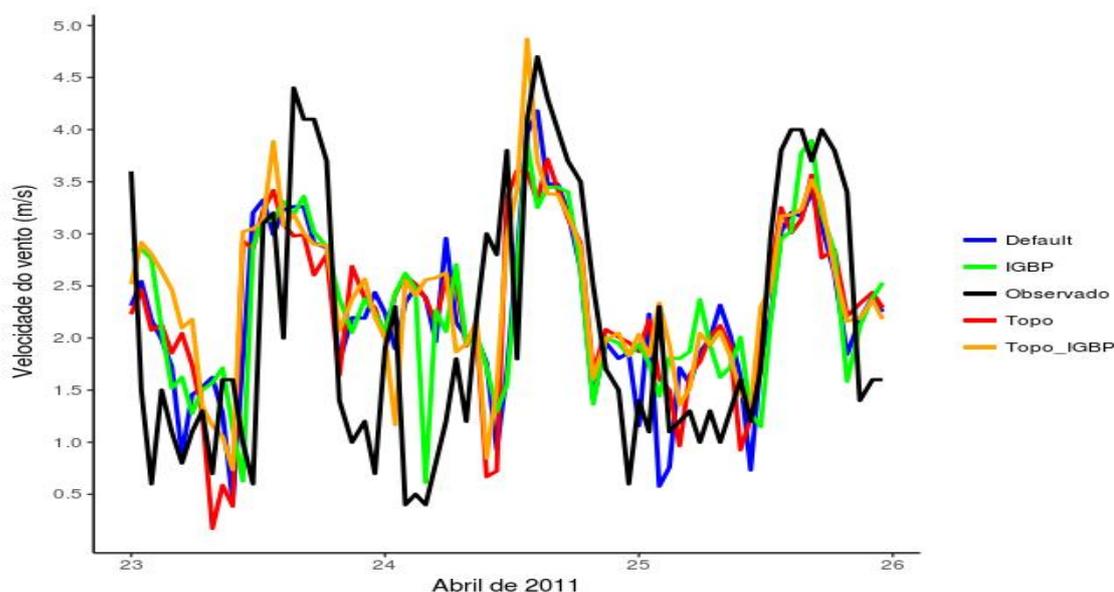
**Figura 3.15 – Umidade relativa do ar simulada com a resolução de 1 km para as quatro do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



**Fonte:** Autor (2018).

A variabilidade horária da umidade relativa simulada (figura 3.15) pelas quatro simulações segue a mesma tendência, porém apresenta mínimos bem acentuados em Topo e IGBP. As quatro simulações geralmente subestimam a temperatura observada nas horas 00, 12 e 18 UTC dos dias analisados.

**Figura 3.16 – Velocidade do vento simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**

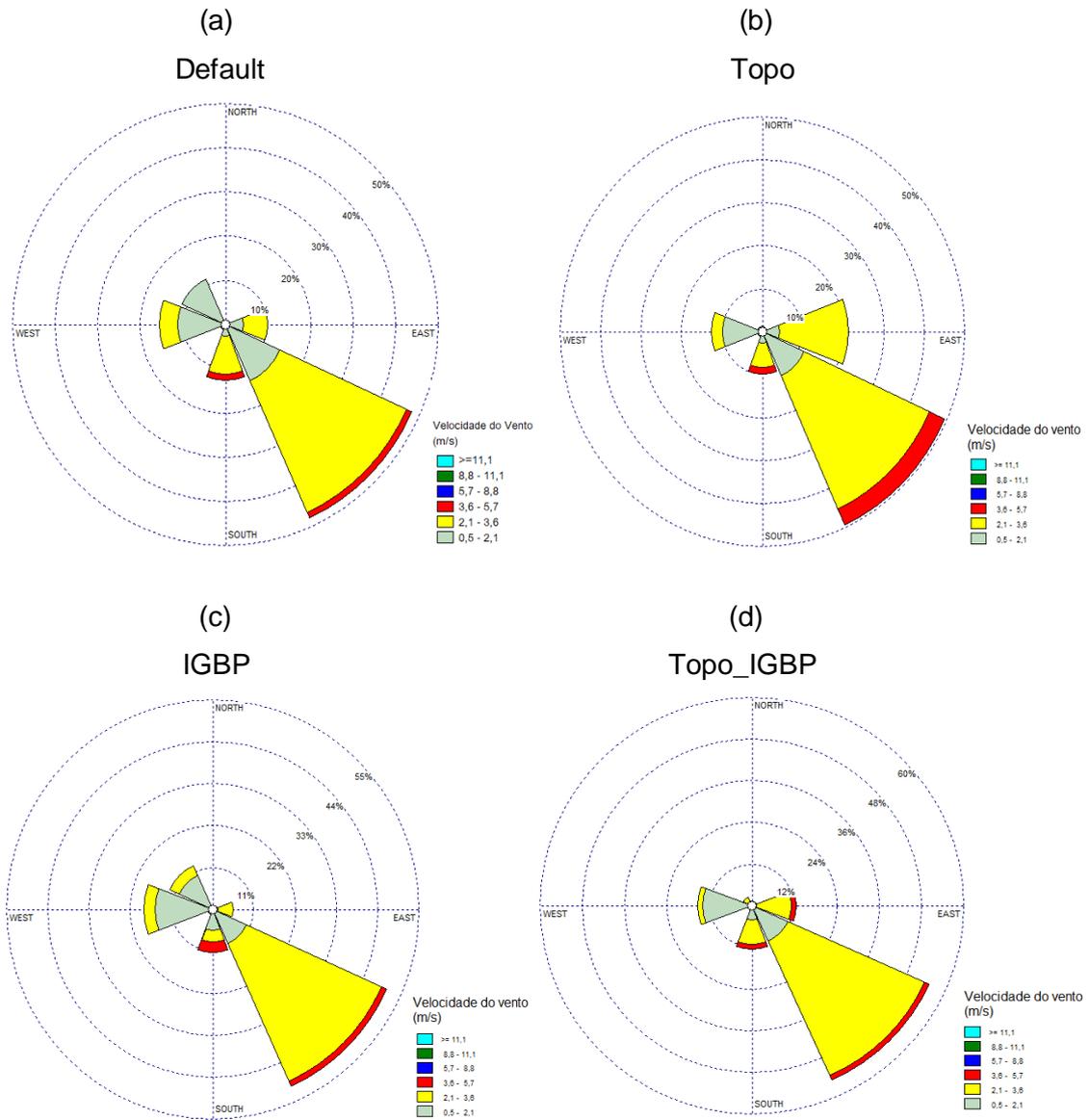


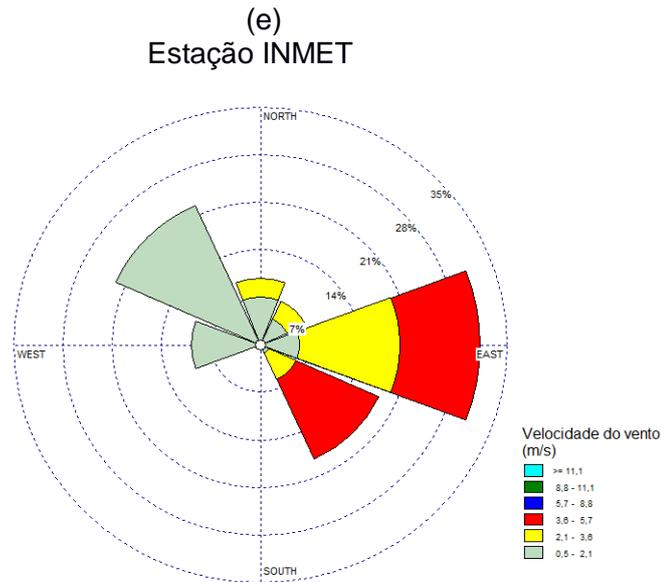
**Fonte:** Autor (2018).

A variabilidade horária da velocidade do vento simulada (figura 3.16) pelas quatro simulações, em geral, segue a mesma tendência da velocidade do vento observada, porém apresentando em algumas horas uma variabilidade bem discrepante em relação às observações.

A direção predominante do vento foi de sudeste (figura 3.17) com velocidades máximas diurnas entre 13 e 17 horas inferiores a 4,9 m/s e velocidades mínimas noturnas superiores a 0,1 m/s. Tais resultados encontrados estão de acordo com Filho e Aragão (2010) (ver figura 3.7 e nomenclatura AMJ) e Bernardo e Molion (2000). A velocidade média diurna foi de 2,6 m/s enquanto a noturna ficou em torno de 2 m/s que também não estão muito discrepantes ao observado em Bernardo e Molion (2000). Nota-se na figura 3.17 que o modelo WRF/CHEM conseguiu representar a formação de brisa nas quatro simulações realizadas, o que está de acordo com as medições realizadas pela estação automática do INMET que também detectou a formação de brisas durante o período estudado.

**Figura 3.17 – Variação percentual da direção do vento simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL - Rosas dos ventos dividida em quatro setores de 45°.**



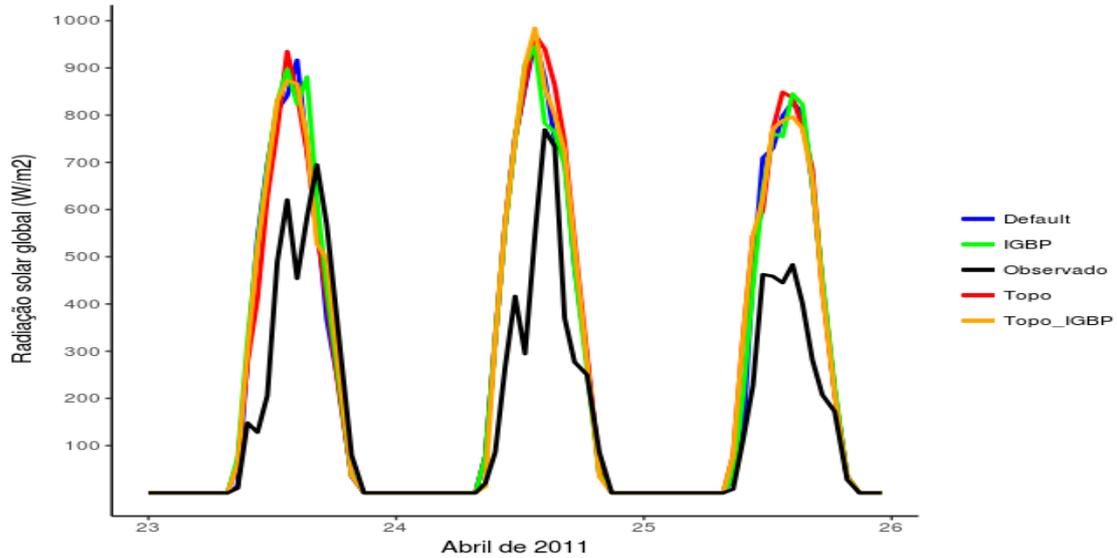


Fonte: Autor (2018).

### 3.3.1.2 Altura da camada limite planetária (CLP) e radiação solar global

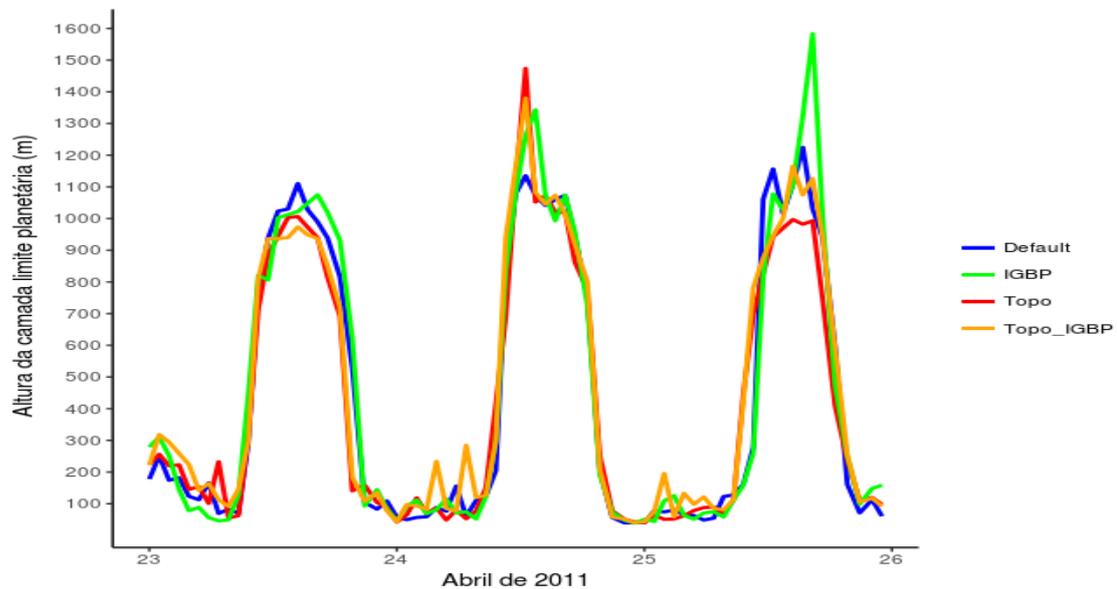
Em relação à incidência de radiação solar, nota-se pela figura 3.18 que as quatro simulações Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP obtiveram uma variabilidade horária muito similar sem nenhuma diferença significativa. Com relação à altura da camada limite planetária (CLP) simulada por Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP percebe-se pela figura 3.19 que a variabilidade horária está similar para as quatro simulações, porém com diferenças mais acentuadas do que as verificadas na simulação da radiação solar.

**Figura 3.18 – Incidência de radiação solar global simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

**Figura 3.19 – Altura da camada limite planetária simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

### 3.3.1.3 Análise estatística

Os índices estatísticos para a temperatura simulada diferem entre si no máximo em 0,5 °C para as médias, 0,08 °C para os desvios-padrões, 0,49 °C para os erros médios, 0,28 °C para os *REMQ* e 0,09 para os coeficientes de correlação (tabela 3.4). Em relação à média e o desvio-padrão da temperatura observada, as temperaturas simuladas diferiram no máximo em 1,37 °C e 0,1°C, respectivamente. Os erros médios positivos indicam que os dados simulados geralmente superestimam as observações, porém um *REMQ* máximo de 1,79 °C mostra que o simulado está próximo do observado. Os coeficientes de correlação ficaram entre 0,5 e 0,6 indicando que em termos de fase o modelo representou razoavelmente às observações. O coeficiente de correlação de 0,56 para a simulação Topo foi, em geral, menor do que os coeficientes encontrados por Vela (2013) e Rojas (2013) considerando todas as estações de medições.

Os índices estatísticos para a umidade relativa simulada diferem entre si no máximo em 2,45% para as médias, 0,87% para os desvios-padrões, 2,45% para os erros médios, 1,1% para os *REMQ* e 0,14 para os coeficientes de correlação (tabela 3.4). Em relação à média e o desvio-padrão da umidade relativa observada, as umidades relativas simuladas diferiram no máximo em 7,47% e 2,08%, respectivamente. Os erros médios negativos indicam que os dados simulados geralmente subestimam as observações, porém um *REMQ* máximo de 9,13 mostra que o simulado não está muito discrepante do observado. A simulação Topo apresentou coeficiente de correlação de 0,58, o que está de acordo com Vela (2013) e Rojas (2013) e mostrando que a variabilidade horária da umidade relativa foi razoavelmente simulada, enquanto que as outras simulações (Default, IGBP e Topo\_IGBP) apresentaram coeficientes de correlação entre 0,5 e 0,7.

A simulação IGBP apresentou a melhor acurácia para a velocidade do vento simulada, pois a média dos dados simulados ficou mais próxima da média das observações e o *REMQ* foi o menor em relação às outras três simulações, enquanto a simulação Topo\_IGP obteve a menor acurácia uma vez que a média dos dados simulados ficou mais distante da média observada e apresentou erro médio (EM) e *REMQ* maiores.

**Tabela 3.4 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para a resolução de 1 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\bar{M}_{sim}$  são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os  $\sigma_{obs}$  e  $\sigma_{sim}$  são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O  $r$  é o coeficiente de correlação,  $EM$  é o erro médio e  $REMQ$  é a raiz do erro médio quadrático.**

Índice estatístico	Variáveis Meteorológicas											
	Temperatura do ar (°C)				Umidade relativa do ar (%)				Velocidade do vento (m/s)			
	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP
$\bar{M}_{sim}$	26,98	26,63	27,13	26,75	81,4	82,54	80,09	81,62	2,33	2,29	2,28	2,41
$\bar{M}_{obs}$	25,76	25,76	25,76	25,76	87,56	87,56	87,56	87,56	2,12	2,12	2,12	2,12
$\sigma_{sim}$	1,34	1,38	1,3	1,38	5,72	6,41	6,59	6,48	0,8	0,8	0,76	0,77
$\sigma_{obs}$	1,4	1,4	1,4	1,4	7,8	7,8	7,8	7,8	1,26	1,26	1,26	1,26
$r$	0,5	0,56	0,59	0,54	0,64	0,58	0,71	0,57	0,57	0,53	0,62	0,54
$EM$	1,23	0,88	1,37	1,0	-6,16	-5,02	-7,47	-5,93	0,12	0,17	0,17	0,29
$REMQ$	1,78	1,51	1,79	1,6	8,36	8,03	9,13	8,69	1,04	1,09	1,0	1,09

Fonte: Autor (2018).

As simulações para a temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram classificadas da seguinte forma:

**Tabela 3.5 – Classificação das simulações (resolução de 1 km) Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP de acordo com a acurácia dos resultados simulados em relação aos dados observados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.**

Classificação	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)
	Simulação	Simulação	Simulação
1.	Topo ( <i>REM</i> Q = 1,51)	Topo ( <i>REM</i> Q = 8,03)	IGBP
2.	Topo_IGBP ( <i>REM</i> Q = 1,6)	Default ( <i>REM</i> Q = 8,36)	Default
3.	Default ( <i>REM</i> Q = 1,78)	Topo_IGBP ( <i>REM</i> Q = 8,69)	Topo
4.	IGBP ( <i>REM</i> Q = 1,79)	IGBP ( <i>REM</i> Q = 9,13)	Topo_IGBP

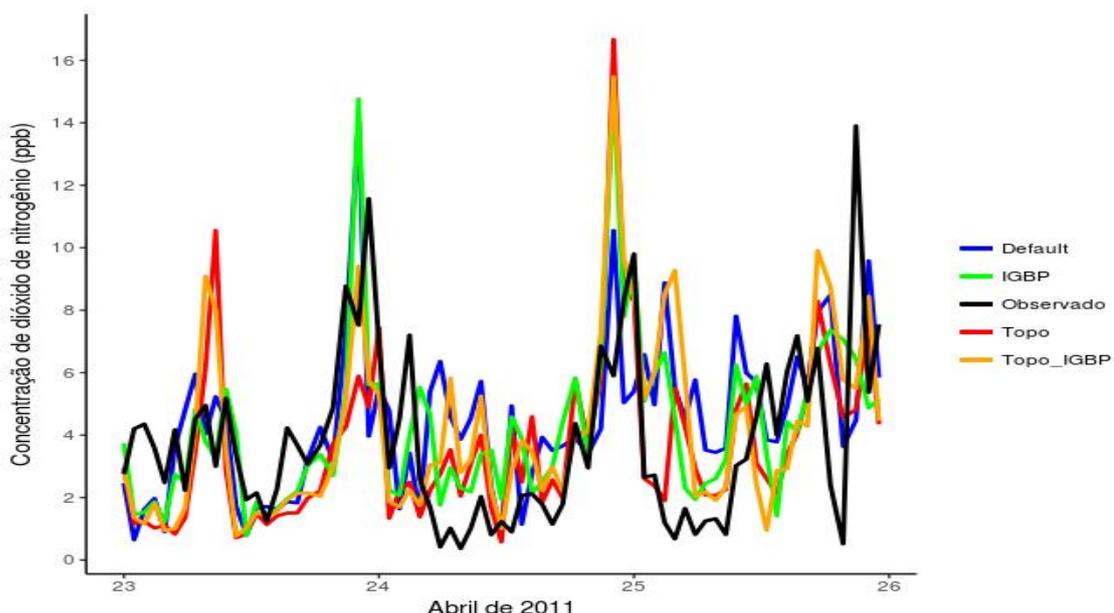
Fonte: Autor (2018).

### 3.3.2 Variáveis químicas

#### 3.3.2.1 Dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

A análise visual da figura 3.20 mostra que os valores obtidos de NO<sub>2</sub> pela simulação Default adotando a resolução de 1 km estão, em geral, mais próximos das observações em relação aos obtidos pela mesma simulação utilizando a resolução de 5 km, indicando que o modelo apresentou sensibilidade ao aumento de resolução. A análise das discrepâncias das quatro simulações em relação às observações é similar e, como na seção seguinte, será realizada uma comparação estatística da acurácia das simulações realizadas, optou-se por fazer uma análise detalhada apenas dos dados simulados pela simulação Topo\_IGBP (linha laranja) que apresentou dois picos de concentração bem acentuados, um no dia 23/04/2011 e outro no dia 24/04/2011. A categoria de uso do solo obtida foi igual a 13 (área urbana) para as quatro simulações, valor igual ao obtido pelas mesmas simulações quando se utilizou a resolução de 5 km. Com relação à simulação Default, o modelo simulou uma altitude do local de medição de um pouco mais de 4 metros (3,4 metros na resolução de 5 km), enquanto a simulação Topo\_IGBP obteve uma altitude de 44 metros (54 metros na resolução de 5 km).

**Figura 3.20 – Concentração de NO<sub>2</sub> simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



Fonte: Autor (2018).

O mínimo noturno simulado (1 ppb às 04 UTC) do dia 23/04/2011 está subestimado em relação ao observado (2 ppb às 06 UTC). O máximo noturno simulado (9,5 ppb às 22 UTC) ocorreu uma hora antes do observado (12 ppb às 23 UTC) e está subestimado. O mínimo diurno simulado (1 ppb às 11 UTC) está superestimado em relação ao observado (1,5 ppb às 14 UTC). O máximo diurno simulado (8 ppb às 9 UTC) foi adiantado em uma hora em relação ao observado (5 ppb às 10 UTC) e está superestimado.

O mínimo noturno simulado (2 ppb às 02 UTC) do dia 24/04/2011 está superestimado em relação ao observado (0,5 ppb às 08 UTC). O máximo noturno simulado (15,5 ppb às 22 UTC) foi adiantado em hora em relação ao observado (8,5 ppb às 23 UTC). O mínimo diurno simulado (1 ppb às 12 UTC) foi atrasado em uma hora em relação ao observado (1 ppb às 11 UTC) e está superestimado. O máximo diurno simulado (5 ppb às 10 UTC) ocorreu em um horário diferente do observado (4,5 ppb às 19 UTC).

O mínimo noturno simulado (2 ppb às 08 UTC) do dia 25/04/2011 está superestimado em relação ao observado (1 ppb às 04 UTC). O máximo noturno simulado (9,5 ppb às 04 UTC) ocorreu na madrugada enquanto que nas observações no início da noite (14 ppb às 21 UTC). O mínimo diurno simulado (1 ppb às 13 UTC) ocorreu pela manhã enquanto que nas observações no final da tarde (0,5 ppb às 20 UTC). O máximo diurno simulado (10 ppb às 18 UTC) está superestimado em relação as observações (7 ppb às 16 UTC).

Os mínimos noturnos verificados nos três dias analisados possivelmente ocorreram pelas reações noturnas de consumo de  $\text{NO}_2$  e pela velocidade média do vento de 2, 4 m/s em uma altura média da CLP de 140 m. Os máximos noturnos dos dias 23 e 24/04/2011 ocorreram às 22 UTC uma vez que a altura média da CLP não ultrapassou 130 m e a velocidade média do vento foi de 2,3 m/s, o que não favoreceu a dispersão de  $\text{NO}_2$ . O máximo noturno simulado do dia 25/04/2011 ocorreu às 04 UTC, horário em que a altura da CLP não ultrapassou 140 m e a velocidade do vento foi em torno de 1, 4 m/s. Os mínimos diurnos ocorreram porque a altura média da CLP foi de quase 1 km favorecendo a atividade fotoquímica de produção e perda de  $\text{NO}_2$  aliada a uma velocidade média do vento de quase 3 m/s. Os máximos diurnos verificados dos dias 23 e 24/04/2011 se deram em condições de altura média da CLP de uma pouco mais de 200 m e velocidade média do vento de 1 m/s, o que não favoreceu a dispersão e difusão do  $\text{NO}_2$ . O máximo do dia 25/04/2011 ocorreu em condições atmosféricas favoráveis a dispersão e difusão de  $\text{NO}_2$  já que altura da CLP atingiu quase 1 km e a velocidade do vento mais de 3 m/s levando a crer que nesse horário as reações fotoquímicas produziram muito  $\text{NO}_2$ .

### 3.3.2.1.1 Análise estatística

Os índices estatísticos para a concentração de NO<sub>2</sub> simulada diferem entre si no máximo em 0,81 ppb para as médias, 0,46 ppb para os desvios-padrões, 0,8 ppb para os erros médios, 0,44 ppb para o *REM<sub>Q</sub>* e 0,21 para os coeficientes de correlação (tabela 3.6). Em relação à média e o desvio-padrão da concentração de NO<sub>2</sub> observada, as concentrações de NO<sub>2</sub> simuladas diferiram no máximo em 0,66 ppb e 0,32 ppb, respectivamente. Os erros médios positivos para Default, IGBP e Topo\_ IGBP indicam que os dados simulados geralmente superestimam as observações, porém um *REM<sub>Q</sub>* máximo de 3,22 ppb mostra que o simulado não está muito discrepante do observado. O erro médio de Topo é negativo, o que indica que geralmente os dados simulados estão subestimados em relação às observações. O coeficiente de correlação de 0,41 obtido pela simulação Topo está de acordo com Vela (2013) que encontrou coeficientes de correlação menores que 0,6 nas várias estações de medida de NO<sub>x</sub>, enquanto o coeficiente de correlação de 0,47 obtido pela simulação IGBP está de acordo com Kuit et al. (2016) que encontraram um coeficiente máximo de correlação de 0,68 entre as várias estações de medida de NO<sub>x</sub> na região de Berlin.

Portanto, as simulações foram classificadas da seguinte forma, de acordo com o *REM<sub>Q</sub>*:

1. IGBP (*REM<sub>Q</sub>* = 2,78);
2. Topo (*REM<sub>Q</sub>* = 2,91);
3. Default (*REM<sub>Q</sub>* = 3,19);
4. Topo \_GBP (*REM<sub>Q</sub>* = 3,22).

**Tabela 3.6 - Índices estatísticos dos dados simulados e observados de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Ozônio (O<sub>3</sub>) e Monóxido de carbono (CO) para a resolução de 1 km para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\bar{M}_{sim}$  são as médias dos valores observados e simulados, respectivamente. Os  $\sigma_{obs}$  e  $\sigma_{sim}$  são os desvios-padrões dos valores observados e simulados, respectivamente. O  $r$  é o coeficiente de correlação,  $EM$  é o erro médio,  $REM_Q$  é a raiz do erro médio quadrático, ppb (partes por bilhão) e ppm (partes por milhão).**

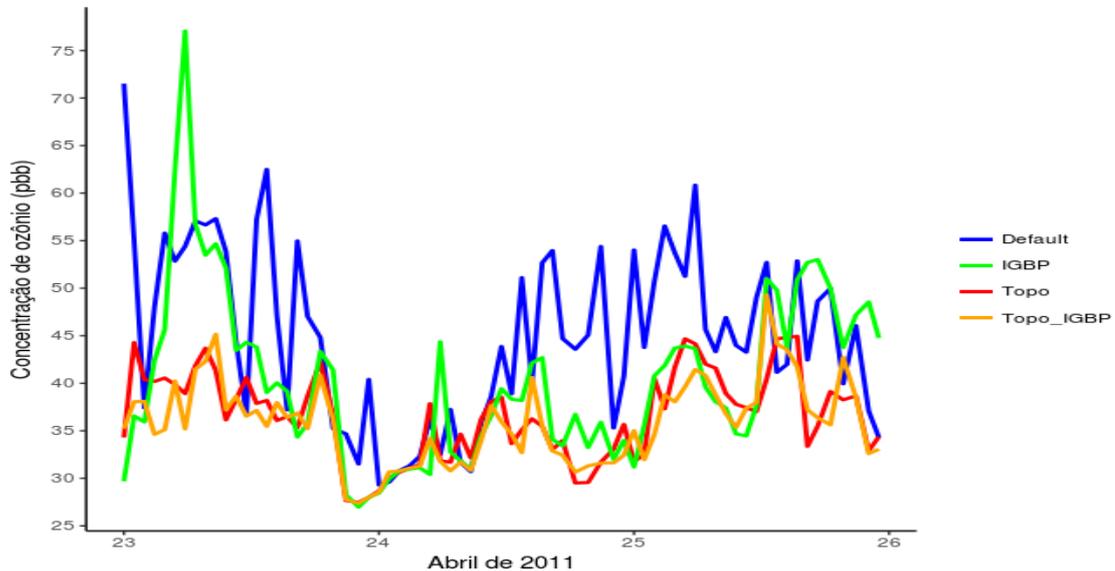
Índice estatístico	Variáveis químicas											
	Dióxido de nitrogênio (ppb)				Ozônio (ppb)				Monóxido de carbono (ppm)			
	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP	Default	Topo	IGBP	Topo_IGBP
$\bar{M}_{sim}$	4,4	3,59	4,16	4,07	45,06	36,66	40,35	35,89	0,1	0,1	0,11	0,11
$\bar{M}_{obs}$	3,74	3,74	3,74	3,74	-	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma_{sim}$	2,42	2,67	2,6	2,88	9,24	4,56	8,95	4,38	0,02	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{obs}$	2,74	2,74	2,74	2,74	-	-	-	-	-	-	-	-
$r$	0,26	0,41	0,47	0,34	-	-	-	-	-	-	-	-
$EM$	0,65	-0,15	0,42	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-
$REM_Q$	3,19	2,91	2,78	3,22	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2018).

### 3.3.2.2 Ozônio (O<sub>3</sub>)

Note pela figura 3.21 que as concentrações simuladas de O<sub>3</sub> para Default, Topo e IGBP estão, em geral, próximas a não ser de 06 as 11 UTC do dia 23/04/2011 e de 16 as 23 UTC do dia 25/04/2011 na simulação IGBP (linha verde). Vamos analisar as possíveis causas das discrepâncias observadas. Em relação ao dia 24/04/2011 a altura média da CLP de 06 as 08 UTC foi de um pouco mais de 50 m e a velocidade média do vento de 1,5 m/s, o que dificultou a dispersão de O<sub>3</sub>. Às 09 UTC a altura da CLP ficou em torno de 130 m e a velocidade do vento em 1,7 m/s, condição um pouco mais favorável à dispersão do que a noite e onde as reações fotoquímicas já começam a interferir nos níveis de concentração de O<sub>3</sub>. Finalmente, de 10 as 11 UTC a altura média da CLP foi um pouco maior que 600 m, não permitindo uma grande difusão de O<sub>3</sub>, e a velocidade média do vento menor que 1 m/s, ou seja, nesse caso a baixa velocidade do vento não favoreceu a dispersão do O<sub>3</sub> formado pelas reações fotoquímicas. Com relação ao dia 25/04/2011, de 16 as 18 UTC, a altura média da CLP maior do que 1 km e a velocidade média do vento de 3,6 m/s favoreceram a dispersão e difusão, porém possivelmente ocorreu a formação de muito O<sub>3</sub> através das reações fotoquímicas, o que gerou concentrações mais altas. De 19 as 20 UTC a altura média da CLP diminuiu bastante ficando em torno de 360 m e a velocidade média do vento ficou em 3 m/s, ou seja, a baixa altura da CLP dificultou a dispersão e difusão de O<sub>3</sub>. À noite, de 21 as 23 UTC, a baixa altura média da CLP de aproximadamente 140 m e uma velocidade média do vento de um pouco mais de 2 m/s não favoreceram a dispersão de O<sub>3</sub>. As concentrações obtidas pela simulação Default estão mais discrepantes em relação às outras três simulações Topo, IGBP e Topo\_IGBP, pois apresentou média e desvio-padrão maiores (veja tabela 3.6).

**Figura 3.21 – Concentração de O<sub>3</sub> simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações realizadas do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**

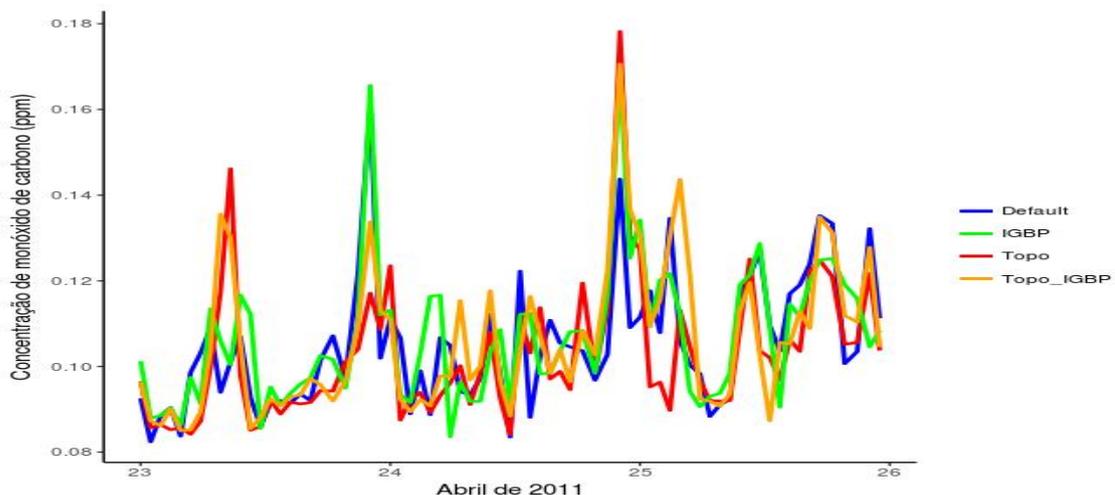


**Fonte:** Autor (2018).

### 3.3.2.3 Monóxido de Carbono (CO)

A análise da figura 3.22 mostra que as concentrações simuladas em Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP são similares. As médias são praticamente iguais e os desvios-padrões são iguais (tabela 3.6). Tal fato reforça que o CO é um gás pouco reativo na atmosfera.

**Figura 3.22 – Concentração de CO simulada com a resolução de 1 km para as quatro simulações do WRF/CHEM para o período de 23 a 25/04/2011 na cidade de Maceió-AL.**



**Fonte:** Autor (2018).

### 3.4 Análise estatística geral

A resolução de 1 km apresentou resultados médios melhores do que a resolução de 5 km em relação às simulações de temperatura do ar, umidade relativa do ar simulada e concentrações de NO<sub>2</sub>, pois apresentou erro médio e REMQ menores e também média mais próxima das observações (tabelas 3.7 e 3.8), porém a representação da variabilidade horária foi melhor simulada com a resolução de 5 km, o que está de acordo com Vela (2013) onde a resolução de 3 km representou melhor a variabilidade horária de temperatura do ar, umidade relativa do ar e concentrações de NO<sub>2</sub> em relação a resolução de 1 km.

A resolução de 5 km apresentou resultados médios melhores do que a resolução de 1 km em relação à velocidade do vento simulada, pois apresentou erro médio e REMQ menores, média mais próxima das observações e também representou de forma mais acurada a variabilidade horária das medições realizadas (tabela 3.7).

**Tabela 3.7 - Índices estatísticos médios dos dados simulados de temperatura do ar e umidade relativa do ar nas resoluções de 5 e 1 km -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\sigma_{obs}$**  são a média e desvio-padrão dos dados observados, respectivamente.  $\bar{M}_s$ ,  $\sigma_{ms}$ ,  $r_m$ ,  $MEM$  e  $MREMQ$  são as médias aritméticas das médias, desvios-padrões, coeficientes de correlação, erros médios e raízes dos erros médios quadráticos, respectivamente, dos dados simulados em Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP.

Índices estatísticos	Variáveis Meteorológicas					
	Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Velocidade do Vento (m/s)	
	5 km	1 km	5 km	1 km	5 km	1 km
$\bar{M}_s$	27,1	26,87	80,2	81,4	2,27	2,33
$\bar{M}_{obs}$	25,76	25,76	87,56	87,56	2,12	2,12
$\sigma_{ms}$	1,34	1,35	7,41	6,3	0,91	0,78
$\sigma_{obs}$	1,4	1,4	7,8	7,8	1,26	1,26
$r_m$	0,62	0,55	0,74	0,63	0,65	0,57
$MEM$	1,34	1,12	-7,33	-6,15	0,15	0,19
$MREMQ$	1,75	1,67	9,0	8,55	0,98	1,06

Fonte: Autor (2018).

**Tabela 3.8 - Índices estatísticos médios dos dados simulados das concentrações de NO<sub>2</sub> nas resoluções de 5 e 1 km** -  $\bar{M}_{obs}$  e  $\sigma_{obs}$  são a média e desvio-padrão dos dados observados, respectivamente.  $\bar{M}_s$ ,  $\sigma_{ms}$ ,  $r_m$ ,  $MEM$  e  $MREMQ$  são as médias aritméticas das médias, desvios-padrões, coeficientes de correlação, erros médios e raízes dos erros médios quadráticos, respectivamente, dos dados simulados em Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP.

NO <sub>2</sub>	5 km	1 km
$\bar{M}_s$	4,96	4,1
$\bar{M}_{obs}$	3,74	3,74
$\sigma_{ms}$	2,63	2,64
$\sigma_{obs}$	2,74	2,74
$r_m$	0,42	0,37
$MEM$	1,2	0,31
$MREMQ$	3,1	3,0

**Fonte:** Autor (2018).

### 3.5 Distribuição espacial de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

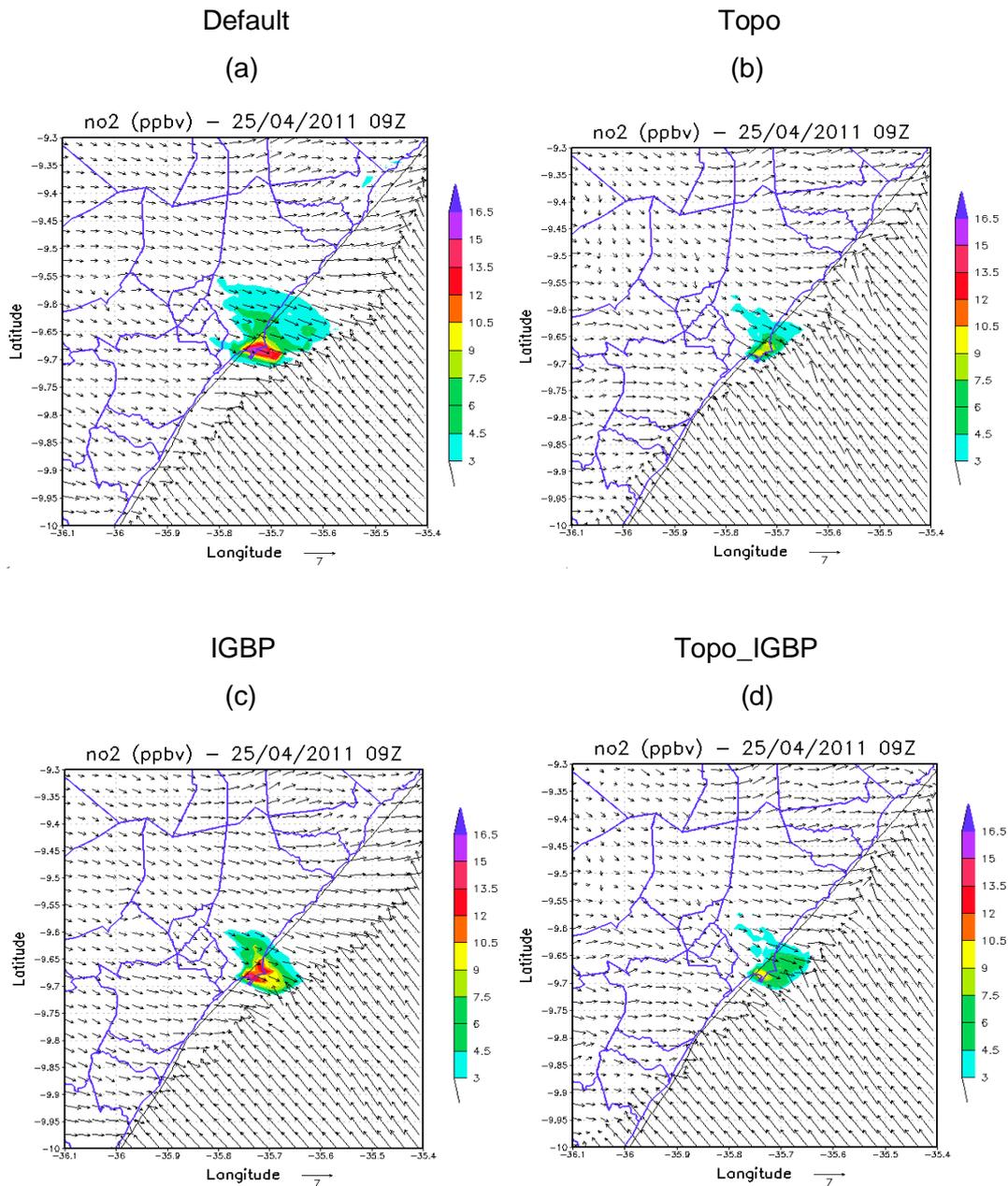
A seguir será feita uma discussão sobre a dispersão das concentrações de NO<sub>2</sub> para outras localidades da cidade de Maceió-AL e também para municípios circunvizinhos. O dia 25/04/2011 foi o escolhido para a análise espacial das dispersões.

A altura média da CLP e a velocidade média do vento às 09 UTC para as quatro simulações foram de 116 m e próxima de 2 m/s, respectivamente. Analisando as imagens das 09 UTC para as simulações Default, Topo, IGBP e Topo\_IGP nota-se que há formação de brisa terrestre que dispersa as concentrações de NO<sub>2</sub> em direção ao mar, ou seja, a brisa terrestre se sobrepõem em relação aos ventos alísios indicando que nesse horário a intensidade da brisa é máxima. Veja a figura 3.23 (a, b, c, d).

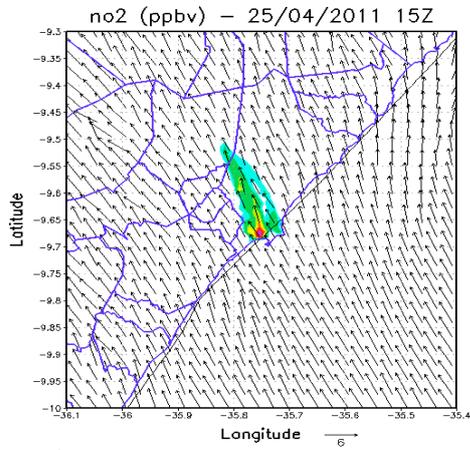
As imagens das 15 UTC para as simulações Default, Topo, IGBP e Topo\_IGBP mostram que a brisa marítima está dispersando as concentrações de NO<sub>2</sub> para dentro da cidade de Maceió-AL e para os limites do município vizinho de Rio Largo. A altura média da CLP para as quatro simulações ultrapassou 1 km e a velocidade média do vento ficou em torno de 3 m/s, condições que favoreceram a dispersão das concentrações de NO<sub>2</sub>. Às 21 UTC as concentrações de NO<sub>2</sub> já estão bem espalhadas sobre Maceió – AL chegando a atingir o município vizinho de Rio Largo indicando que de 15 as 20 UTC as condições foram favoráveis à dispersão das concentrações de NO<sub>2</sub>. Às 21 UTC a altura média da CLP e a

velocidade média do vento para as quatro simulações foram em torno de 97 m e 2 m/s, respectivamente o que já não é muito favorável a dispersão.

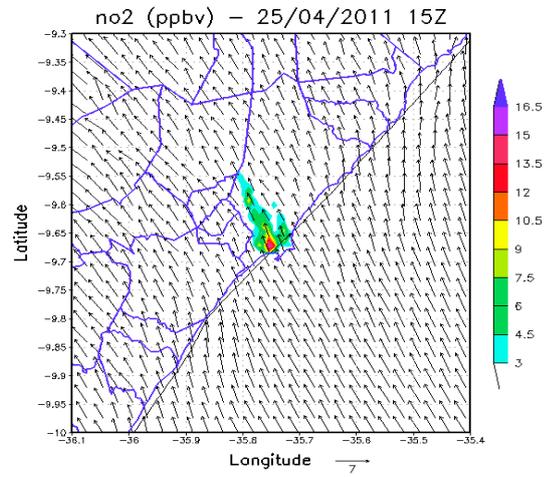
**Figura 3.23 – Dispersão espacial de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) simulada para as quatro simulações executadas.**



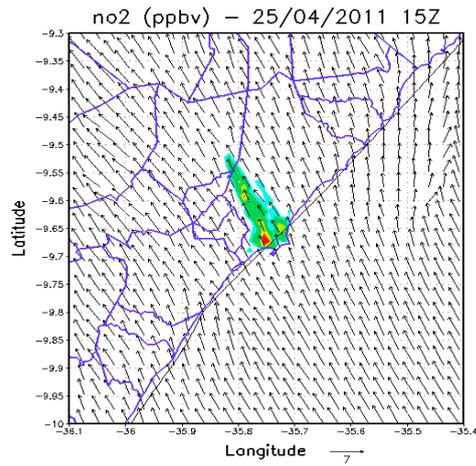
Default  
(e)



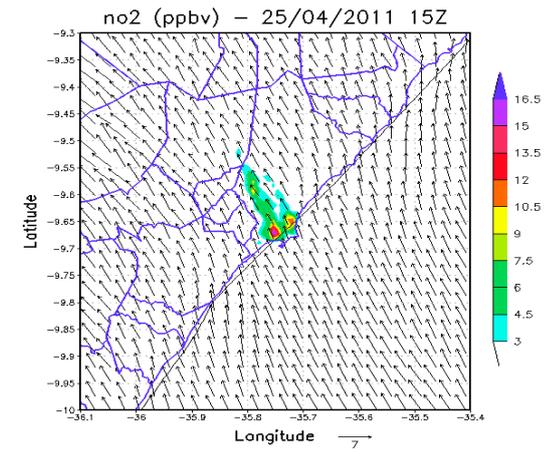
Topo  
(f)



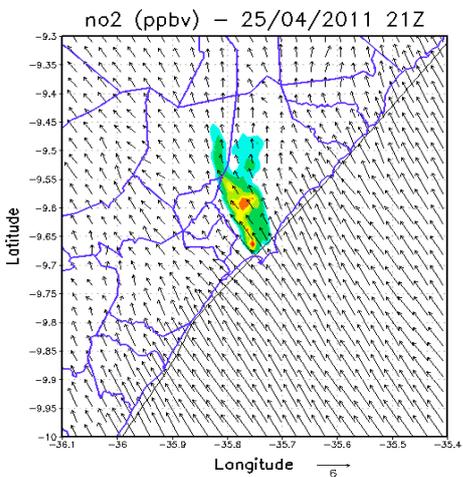
IGBP  
(g)



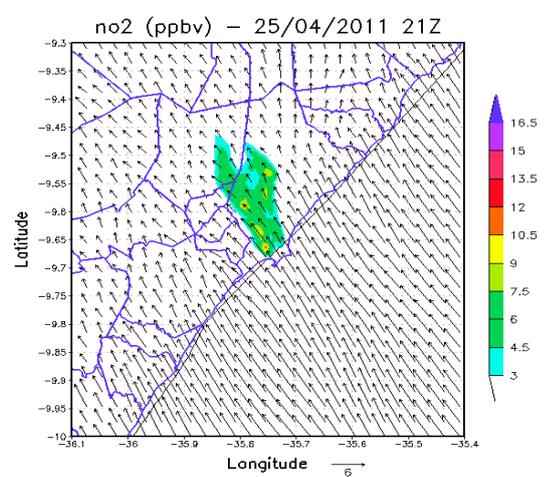
Topo\_IGBP  
(h)

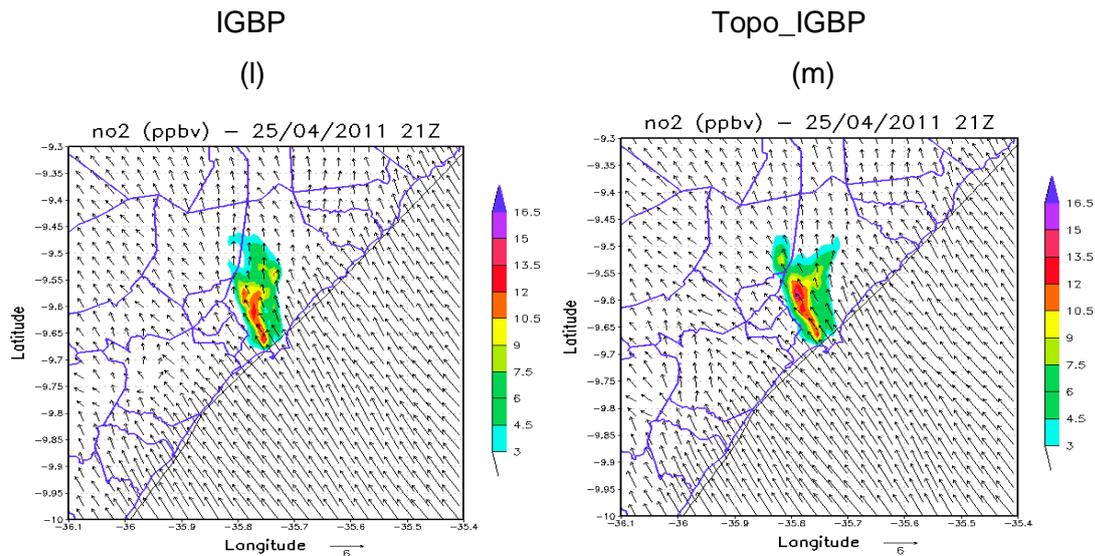


Default  
(i)



Topo  
(j)





Fonte: Autor (2018).

### 3.6 Avaliação da qualidade do ar na cidade de Maceió-AL

As concentrações simuladas de NO<sub>2</sub>, CO e O<sub>3</sub>, para o local de medição de NO<sub>2</sub> escolhido, não ultrapassaram os padrões primários estabelecidos pela resolução CONAMA (1990), conforme visto na tabela 3.9, porém deve-se ressaltar que o local de medição encontra-se em uma região coberta por muitas árvores e um pouco distante da principal via de veículos da cidade de Maceió, contribuindo para os baixos valores de NO<sub>2</sub> medidos. Portanto, resolveu-se simular as concentrações de poluentes em uma localidade no centro de Maceió, região que se caracteriza por ter um tráfego intenso de veículos durante a semana, para mostrar que pode haver lugares onde a qualidade do ar em Maceió está mais deteriorada em relação ao local de medição escolhido no presente trabalho.

A tabela 3.9 mostra que as concentrações simuladas dos poluentes NO<sub>2</sub>, CO e O<sub>3</sub> no centro de Maceió também não ultrapassaram os padrões estabelecidos pela legislação brasileira vigente, porém o valor de 40 e 55 ppb para as concentrações de NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>, respectivamente, estão maiores em relação as concentrações desses mesmos poluentes no local de medição de NO<sub>2</sub> utilizado no presente trabalho.

**Tabela 3.9 – Comparação das concentrações simuladas de NO<sub>2</sub>, CO e O<sub>3</sub> em relação aos padrões primários estabelecidos pela resolução CONAMA (1990) - ppb ( partes por bilhão) e ppm (partes por milhão).**

Poluente	Padrão primário – CONAMA (1990)	Medições	Simulação no local de medição de NO <sub>2</sub> Latitude: 9° 36' 52,72'' sul Longitude: 35° 44' 25,35'' oeste		Simulação no centro de Maceió Latitude: 9° 40' 0,01'' sul Longitude: 35° 44' 5,33'' oeste	
			5 km	1 km	5 km	1 km
NO <sub>2</sub> (ppb)	170	14	18	17	18	40
CO (ppm)	35	-	0,2	0,18	0,22	0,35
O <sub>3</sub> (ppb)	80	-	35	50	48	55

Fonte: Autor (2018).

#### 4. CONCLUSÕES

Não existe uma diferença muito significativa entre as resoluções de 1 e 5 km da acurácia das simulações de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento. Kuit et al. (2016) também obteve resultados semelhantes para a temperatura e velocidade e direção do vento simuladas para três resoluções diferentes, 15, 3 e 1 km, onde os coeficientes de correlação para a temperatura simulada foram muito próximos e a velocidade e direção do vento não diferiram muito para as três resoluções.

A simulação Default não é adequada para simular as concentrações de ozônio ( $O_3$ ) na cidade de Maceió, pois Default apresentou baixa acurácia na simulação de  $NO_2$  utilizando as resoluções de 5 e 1 km.

O uso do WRF/CHEM com a resolução de 1 km obteve resultados melhores para as simulações da temperatura do ar, umidade relativa do ar e concentrações de dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) do que os resultados obtidos com a resolução de 5 km, porém a variabilidade horária é mais bem representada pela resolução de 5 km. A velocidade do vento foi mais bem representada na resolução de 5 km.

A simulação Topo utilizando a resolução de 1 km foi a que apresentou melhor acurácia em simular as observações, seguida pelas simulações Default, IGBP e Topo\_IGBP, nessa ordem. A simulação Topo utilizando a resolução de 5 km foi a que apresentou melhor acurácia em simular as observações, seguida pelas simulações Topo\_IGBP, IGBP e Default, nessa ordem.

A atualização da topografia se mostrou mais eficiente do que a atualização do uso do solo para a obtenção de dados simulados mais próximos das observações. Era de se esperar que a simulação Topo\_IGBP apresentasse os melhores resultados para as simulações das variáveis meteorológicas e concentrações de poluentes, o que de fato não ocorreu, porém deve-se ressaltar que a atualização da topografia e uso do solo utilizou dados do ano de 2001, enquanto a simulação do presente trabalho foi feita para o ano de 2011, ou seja, há uma defasagem de 10 anos dos dados de atualização.

A localidade do centro de Maceió escolhida apresentou maiores concentrações de  $NO_2$  e  $O_3$  em relação ao local de medição de  $NO_2$  utilizado no presente trabalho, mostrando que a qualidade do ar em lugares próximos do trânsito de veículos pode apresentar concentrações de poluentes que podem ultrapassar o padrão permitido pela legislação vigente.

## 5 . TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho ainda tem muitas questões para serem respondidas e que podem servir de base para estudos futuros mais aprofundados. A seguir estão enumeradas as principais perguntas.

- No trabalho exposto foi utilizado um único perfil temporal de emissão para o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. Tal perfil foi constante para todos os dias na semana, exceto nos finais de semana onde há uma redução de 20% nas emissões. Será que a utilização de perfis temporais específicos para cada poluente influencia na obtenção de resultados melhores ou piores em relação aos resultados obtidos com um único perfil temporal?
- A variação da emissão horária de acordo com o dia da semana fornecerá resultados melhores ou piores do que os resultados obtidos com a utilização de perfis temporais com emissões horárias constantes ao longo da semana?

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvim, D. S. **Estudo dos principais precursores de ozônio na região metropolitana de São Paulo**. 2013. 161 f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade de São Paulo, 2013.

Bernardo, S. O.; Molion, L. C. B. Variabilidade do vento para a cidade de Maceió-AL. In: XI Congresso brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/portal/sbmet/detalhe.php?id=44>>. Acesso em: 18 set. 2017.

Broxton, P. D.; Zeng, X.; Sulla-Menashe, D.; Troch, P. A. A global land cover climatology using Modis data. **Journay of Applied Meteorology and Climatology**. v. 53, 2014.

Conin, A. N.; Souza, R. B.; Acevedo.; O. C.; Anabor, V. Análise do desempenho do modelo Weathet Research and forescating (WRF) com diferentes esquemas de microfísica e camada limite planetária na ilha Deception, Antártica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2016.

Calderón, M. E. G.; **Impacto das condições de contorno químicas na representação ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo com o modelo WRF-Chem**. 2015. 113 f. dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CONAMA, 1989. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução N° 5 de 15 de junho de 1989. Brasília, 1989.

CONAMA, 1990. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução N° 3 de 28 de junho de 1990. Brasília, 1990.

CETESB, 2016. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2015**. Série relatórios/CETESB, São Paulo, 213 p. (ISSN 0103-4103).

CETESB, 2011. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2011**. Série relatórios/CETESB, São Paulo, 70 p. (ISSN 0103-4103).

CETESB, 2017. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2016**. Série relatórios/ CETESB, São Paulo, 200 p. (ISSN 0103-4103).

Chou, M. D.; Suarez, M. J.; Ho, C. H.; Yan, M. M. H., Lee, K. T. Parametrizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. **Journal of Climate**, v. 11, 202–214, 1998.

Departamento Nacional de Trânsito. **Frota de veículos 2016**. 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/261-frota-2016>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

Ek, M. B.; Mitchell, K. E.; Lin, Y.; Rogers, E.; Grunmann, P.; Koren, V.; Gayno, G.; Tarpley, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. **Journay of Geophysical Research**, v. 108, 2003.

Filho, W. L. F. C.; Aragão, M. R. S. Análise da variabilidade sazonal do vento no aeroporto de Maceió-AL – Parte I: Direção do vento. **Revista Ciência e Natura**, p. 189-192.

Fernandes, R. C. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

Ferreira, A. G.; Silva Mello, N. G. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-18, 2005.

Grell, G. A.; Peckham, S. E.; Schmitz, R.; McKeen, S. A.; Frost, G.; Skamarock, W. C.; Eder, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 6957-6975, 2005.

Germano, A. S. **Estimativa da concentração de poluentes (CO, NO e NO<sub>2</sub>) de origem veicular na cidade de Maceió, utilizando o modelo WRF/CHEM**. 2014. 57 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

Iacono, J. M.; Delamere, J. S.; Mlawer, E. J.; Shephard, M. W.; Clough, S. A.; Collins, W. D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journey of Geophysical Research**, v. 113, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas de população**. 2017. Disponível em:

< <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=9112&t=downloads> >. Acesso em: 20 dez. 2017.

Kuik, F.; Lauer, A.; Churkina, G.; van de Gon, H. A. C. D.; Fenner, D.; Mar, K. A.; Butler, T. M. Air quality modelling in the Berlin-Brandenburg region using WRF-Chem v3.7.1: sensitivity to resolution of model grid and input data. **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 4339-4363, 2016.

Lin, Y. -L.; Farley, R. D.; Orville, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **Journey of Applied Meteorology**, v. 22, p. 1065–1092, 1983.

Lisboa, H. M. Controle da poluição atmosférica. In: \_\_. **Fontes de poluição atmosférica**. 2014. Cap. 2, 24 p.

Martins, E. M.; Meireles, A. R.; Magalhaes, F. R.; Carvalho, J. B. B.; Ribeiro, M. M. Concentrações de poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro em relação a normas nacionais e internacionais. **Revista Internacional de Ciências**, v. 07, n. 01, p. 32-48, 2017.

Mariano, G. L. **Meteorologia em tópicos: Poluição atmosférica**. In: Alonso, M. F.; Da Silva, K. L. A. (1. Ed. ). **Inventários de fontes de emissão**. Pelotas: DR Ltda, 2014. cap. 1, p. 9-43.

Madronich, S. Photodissociation in the atmosphere, 1, actinic flux and the effects of ground reflection and clouds. **Journey of Geophysical Research**, v. 92, p. 9740-97, 1990.

Monin, A. S.; Obukhov, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the Surface Layer of the atmosphere. **Geophysical Institute Academy of Sciences**, v. 24, p. 163-187, 1954.

Pleim, J. E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Parte I: Model description and testing. **Journay of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, p. 1383-1395, 2007.

Rojas, C. S. A. **Condições meteorológicas e níveis de poluição na Região Metropolitana de Lima – Perú**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Silva Júnior, R. S.; Lyra, R. F. F.; Silva Ramos, D. N.; Moura, M. A. L.; Gomes, H. B.; Holanda, S.C. Prognóstico do vento para o estado de alagoas utilizando o modelo wrf em alta resolução: avaliação da melhoria da topografia, uso do solo e velocidade de fricção. **Revista Ciência e Natura**, v. 38, p. 137-144, 2016.

Silva Júnior, R. S. **Sensibilidade na estimativa da concentração de poluentes fotoquímicos com a aplicação de diferentes parametrizações da Camada Limite Planetária utilizando o modelo de qualidade do ar WRF/Chem**. 2009. 171 f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade de São Paulo, 2009.

Silva Júnior, R. S.; Andrade, M. F.; Validação de poluentes fotoquímicos e inclusão do inventário de emissões no modelo de qualidade do ar WRF/CHEM, para a Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 105-121, 2013.

Souza, D. C. **Brisa na costa do norte e nordeste brasileiro**. 2016. 150 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006. 1225 p.

Stockwell, W. R., Middleton, P.; Chang, J. S.; Tang, X. The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. **Journay of Geophysical Research**, v. 95, p. 16343-16367, 1990.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B.; Dudhia, J.; Gill, D. O.; Barker, D. M.; Duda, M. G.; Huang, X.; Wang, W.; Powers, J. G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note TN-475\_STR, 113 pp.

Teledyne Advanced Pollution Instrumentation (Teledyne API). **Model 200A NOX Analyzer Instruction Manual**. San Diego, 2005.

Tie, X.; Brasseur, G.; Ying, Z. Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City: application of the WRF-Chem model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 8983-8995, 2010.

Tie, X.; Madronich, S.; Li, G.; Ying, Z.; Zhang, R.; Garcia, A. R.; Lee-Taylor, J.; Liu, Y. Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 1989-2008, 2007.

Vela, Á. L. V. **Avaliação do impacto da mudança dos fatores de emissão veicular na formação de ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. 2013. 145 f. Dissertação - (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

## APÊNDICE A – Coordenadas dos pontos de emissão e seus respectivos pesos na cidade de Maceió-AL.

Tabela 01: Pontos de emissão e seus respectivos pesos na cidade de Maceió-AL.

lat	lon	Peso												
-9,6717	-35,7585	C	-9,63278	-35,7368	A	-9,6063	-35,7408	D	-9,56612	-35,7775	D	-9,65854	-35,7204	B
-9,6695	-35,7507	B	-9,6394	-35,7356	E	-9,6051	-35,7224	C	-9,5658	-35,7443	B	-9,66682	-35,7327	B
-9,6678	-35,7445	C	-9,63909	-35,7178	C	-9,6036	-35,77	A	-9,5643	-35,7735	B	-9,66935	-35,7255	C
-9,6669	-35,7418	D	-9,6364	-35,716	C	-9,6029	-35,7472	A	-9,5627	-35,771	B	-9,66235	-35,7131	C
-9,66287	-35,7378	E	-9,6345	-35,7063	B	-9,5977	-35,7712	B	-9,56059	-35,7802	A	-9,66235	-35,7176	C
-9,66095	-35,7289	C	-9,6342	-35,7158	C	-9,5965	-35,7234	B	-9,5595	-35,7646	A	-9,65635	-35,7157	B
-9,6602	-35,7385	E	-9,6312	-35,7155	B	-9,59389	-35,7523	A	-9,5586	-35,7473	A	-9,65506	-35,7171	C
-9,65945	-35,733	C	-9,6284	-35,7376	E	-9,5953	-35,7515	B	-9,5565	-35,7585	A	-9,65288	-35,7165	C
-9,65863	-35,7362	C	-9,628	-35,717	C	-9,5922	-35,7739	A	-9,5543	-35,753	A	-9,65285	-35,7119	C
-9,65675	-35,7333	D	-9,6275	-35,751	C	-9,5919	-35,7257	A	-9,55108	-35,7852	A	-9,65468	-35,7215	B
-9,65396	-35,7405	E	-9,6254	-35,752	C	-9,5897	-35,7606	B	-9,54157	-35,7903	A	-9,65068	-35,7186	B
-9,65359	-35,7399	C	-9,62377	-35,7386	A	-9,5894	-35,7763	A	-9,53206	-35,7953	A	-9,6644	-35,7295	B
-9,65205	-35,7367	C	-9,6245	-35,7385	C	-9,5872	-35,7309	A	-9,52255	-35,8004	A	-9,66172	-35,7272	C
-9,6508	-35,7331	E	-9,6239	-35,7166	B	-9,5847	-35,7337	A	-9,51305	-35,8054	A	-9,66033	-35,7256	C
-9,6484	-35,7427	C	-9,6218	-35,754	B	-9,5844	-35,7766	A	-9,5137	-35,8051	A	-9,61648	-35,6892	C
-9,6472	-35,7266	D	-9,6207	-35,7572	B	-9,5853	-35,7784	A	-9,65832	-35,7248	B	-9,62892	-35,7415	C
-9,64372	-35,719	C	-9,6193	-35,7603	A	-9,5834	-35,7748	A	-9,65336	-35,7032	B	-9,63877	-35,7416	C
-9,64179	-35,7349	A	-9,6164	-35,713	B	-9,58069	-35,7673	A	-9,65333	-35,7123	B	-9,62678	-35,7473	C
-9,6404	-35,7454	C	-9,6155	-35,7641	A	-9,5803	-35,7738	A	-9,65578	-35,7102	C	-9,62108	-35,7568	C
-9,6365	-35,7126	B	-9,6155	-35,7174	D	-9,5773	-35,7729	A	-9,65886	-35,7013	B	-9,61859	-35,7617	C
-9,63623	-35,7181	C	-9,61543	-35,7394	E	-9,5769	-35,7719	A	-9,65896	-35,7085	B	-9,61252	-35,7668	D
-9,6354	-35,7027	B	-9,6109	-35,7192	C	-9,5767	-35,7375	B	-9,66015	-35,7022	B	-9,65296	-35,7597	C
-9,6352	-35,7098	B	-9,6107	-35,7682	A	-9,5724	-35,74	A	-9,66009	-35,7086	B	-9,65557	-35,7572	C
-9,6329	-35,7492	C	-9,60648	-35,7408	A	-9,5701	-35,7751	C	-9,65868	-35,7133	B	-9,6571	-35,7621	C

Tabela 02: Pontos de emissão e seus respectivos pesos na cidade de Maceió-AL.

lat	lon	Peso												
-9,66145	-35,7617	C	-9,64475	-35,6994	A	-9,67066	-35,742	B	-9,66833	-35,7401	B	-9,67359	-35,7641	B
-9,67024	-35,7615	C	-9,65674	-35,6985	A	-9,6696	-35,7336	A	-9,66852	-35,7337	B	-9,67036	-35,7644	B
-9,66027	-35,7557	C	-9,63598	-35,6979	C	-9,6698	-35,7307	A	-9,66731	-35,7359	B	-9,65905	-35,7658	B
-9,66607	-35,7518	C	-9,63064	-35,696	C	-9,67239	-35,7239	B	-9,6668	-35,7329	B	-9,64934	-35,759	B
-9,66859	-35,7362	B	-9,64184	-35,7004	C	-9,67406	-35,7188	B	-9,66706	-35,7281	B	-9,65577	-35,752	B
-9,66532	-35,7357	A	-9,64317	-35,7027	B	-9,68384	-35,7231	B	-9,66728	-35,7233	B	-9,65455	-35,7418	B
-9,66632	-35,7384	B	-9,64279	-35,7079	B	-9,66865	-35,7141	B	-9,66851	-35,7203	B	-9,65218	-35,7368	B
-9,66377	-35,7366	A	-9,64525	-35,7023	B	-9,66345	-35,7055	A	-9,66706	-35,7368	A	-9,64872	-35,7302	B
-9,66149	-35,7379	B	-9,64509	-35,7078	B	-9,66238	-35,6959	A	-9,66533	-35,7339	A	-9,64718	-35,7245	B
-9,66571	-35,7371	B	-9,64506	-35,7104	B	-9,65086	-35,7236	D	-9,66385	-35,7315	A	-9,57187	-35,7832	D
-9,66174	-35,7362	A	-9,64672	-35,712	B	-9,61132	-35,7501	D	-9,66083	-35,7276	B	-9,57659	-35,7788	D
-9,66087	-35,7401	A	-9,64813	-35,7132	A	-9,60826	-35,743	E	-9,67305	-35,7623	A	-9,54286	-35,7858	D
-9,65917	-35,7365	A	-9,65059	-35,7156	A	-9,62082	-35,715	C	-9,67189	-35,7586	A	-9,5418	-35,7248	C
-9,65641	-35,7352	A	-9,65592	-35,7211	B	-9,62768	-35,717	C	-9,67021	-35,7528	A	-9,54821	-35,7212	B
-9,65176	-35,7338	A	-9,65121	-35,7035	B	-9,63402	-35,7157	C	-9,66891	-35,7485	A	-9,5552	-35,7292	B
-9,65626	-35,7333	A	-9,65126	-35,7093	B	-9,64385	-35,7188	A	-9,66729	-35,7425	A	-9,55744	-35,727	B
-9,65255	-35,7331	A	-9,6512	-35,7139	B	-9,66303	-35,7624	C	-9,66729	-35,7409	B	-9,55491	-35,7206	C
-9,65929	-35,7331	A	-9,69687	-35,7772	C	-9,66323	-35,7591	C	-9,66682	-35,7409	B	-9,57969	-35,7557	D
-9,65981	-35,7301	A	-9,68814	-35,7688	C	-9,66368	-35,7541	C	-9,66648	-35,7392	B	-9,59727	-35,7355	E
-9,65971	-35,7417	A	-9,68449	-35,7641	B	-9,66394	-35,75	B	-9,66559	-35,7364	A	-9,60589	-35,7367	D
-9,65579	-35,7404	B	-9,68013	-35,7592	B	-9,66438	-35,7443	B	-9,66382	-35,7339	B	-9,60991	-35,736	E
-9,64896	-35,7438	B	-9,67748	-35,76	D	-9,66458	-35,7414	A	-9,66206	-35,7321	B	-9,60269	-35,7308	D
-9,64313	-35,7441	B	-9,67692	-35,7546	B	-9,66559	-35,7433	B	-9,66077	-35,7305	B	-9,60366	-35,717	C
-9,63723	-35,7473	B	-9,67262	-35,7469	B	-9,66833	-35,7401	B	-9,63207	-35,7153	C	-9,6059	-35,7152	C

## APÊNDICE B - Relatório de Emissões Veiculares (CETESB, 2016).

**Tabela 01:** Fator de emissão para automóveis movidos à gasolina (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	19,35	1,14	0,002	1,022
2002	1,03	0,19	0,001	0,083
2003	0,96	0,18	0,001	0,083
2004	0,86	0,15	0,001	0,083
2005	0,8	0,14	0,001	0,075
2006	0,72	0,11	0,001	0,063
2007	0,67	0,11	0,001	0,063
2008	0,69	0,08	0,001	0,053
2009	0,47	0,05	0,001	0,02
2010	0,43	0,05	0,001	0,023
2011	0,46	0,05	0,001	0,028
2012	0,41	0,04	0,001	0,023
2013	0,33	0,03	0,001	0,019
2014	0,27	0,02	0,001	0,016
2015	0,19	0,02	0,001	0,012
2016	0,19	0,02	0,001	0,012

**Tabela 02:** Fator de emissão para automóveis movidos a etanol (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	11,46	0,72	0,002	0,815
2002	1,38	0,14	0,001	0,117
2003	1,37	0,14	0,001	0,117
2004	1,38	0,13	0,001	0,125
2005	1,33	0,13	0,001	0,125
2006	1,13	0,09	0,001	0,088

**Tabela 03:** Fator de emissão para automóveis flex (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
2003	1,08	0,15	0,001	0,074
2004	0,96	0,15	0,001	0,082
2005	0,91	0,13	0,001	0,093
2006	0,94	0,1	0,001	0,08
2007	0,9	0,09	0,001	0,08
2008	0,89	0,08	0,001	0,08
2009	0,74	0,06	0,001	0,036
2010	0,66	0,06	0,001	0,036
2011	0,6	0,06	0,001	0,038
2012	0,54	0,05	0,001	0,04
2013	0,45	0,04	0,001	0,038
2014	0,38	0,03	0,001	0,037
2015	0,32	0,02	0,001	0,036
2016	0,32	0,02	0,001	0,036

Nota: Os fatores de emissão são a média dos fatores de emissão para os combustíveis etanol e gasolina

**Tabela 04:** Fator de emissão para comerciais leves movidos a etanol (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	11,82	1,27	0,0021	0,832
2002	1,36	0,88	0,0011	0,161
2003	1,32	0,87	0,0011	0,12
2004	1,28	0,87	0,0011	0,12
2005	1,1	0,73	0,0011	0,167
2006	1,06	0,33	0,0011	0,09

**Tabela 05:** Fator de emissão para comerciais leves movidos à gasolina (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	23,82	1,2	0,0021	1,094
2002	1,5	0,23	0,0011	0,086
2003	1,56	0,22	0,0011	0,083
2004	1,52	0,2	0,0011	0,092
2005	1,33	0,28	0,0011	0,109
2006	1,21	0,3	0,0011	0,073
2007	1,11	0,12	0,0011	0,097
2008	0,9	0,09	0,0011	0,062
2009	0,64	0,06	0,0011	0,025
2010	0,6	0,05	0,0011	0,02
2011	0,55	0,05	0,0011	0,024
2012	0,48	0,03	0,0011	0,019
2013	0,31	0,03	0,0011	0,017
2014	0,3	0,02	0,0011	0,017
2015	0,22	0,01	0,0011	0,015
2016	0,22	0,01	0,0011	0,015

**Tabela 06:** Fator de emissão para comerciais leves flex (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
2003	1,14	0,16	0,0011	0,075
2004	1,01	0,15	0,0011	0,08
2005	0,96	0,13	0,0011	0,09
2006	0,91	0,15	0,0011	0,099
2007	0,91	0,12	0,0011	0,076
2008	0,85	0,11	0,0011	0,076
2009	0,68	0,07	0,0011	0,024
2010	0,66	0,07	0,0011	0,022
2011	0,7	0,05	0,0011	0,033
2012	0,68	0,06	0,0011	0,041
2013	0,57	0,06	0,0011	0,04
2014	0,49	0,05	0,0011	0,047
2015	0,39	0,03	0,0011	0,03
2016	0,39	0,03	0,0011	0,03

Nota: Os fatores de emissão são a média dos fatores de emissão para os combustíveis etanol e gasolina.

**Tabela 07:** Fator de emissão para comerciais leves movidos a diesel (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	0,302	2,48	0,08	nd
2002	0,277	2,516	0,071	nd
2003	0,245	2,429	0,073	nd
2004	0,516	2,026	0,054	nd
2005	0,499	2,018	0,054	nd
2006	0,468	2,254	0,074	0,093
2007	0,468	2,254	0,074	0,093
2008	0,571	1,716	0,043	0,083
2009	0,509	1,65	0,036	0,025
2010	0,745	1,952	0,044	0,057
2011	0,477	1,468	0,032	0,043
2012	0,05	0,311	0,018	0,017
2013	0,075	0,277	0,015	0,014
2014	0,08	0,285	0,0145	0,01
2015	0,051	0,28	0,018	0,008
2016	0,051	0,28	0,018	0,008

Nota: nd – não disponível.

**Tabela 08:** Fator de emissão para motocicletas flex (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	NMHC (g/km)
2010	0,667	0,059	0,114
2011	0,72	0,06	0,113
2012	0,82	0,04	0,113
2013	0,74	0,043	0,109
2014	0,74	0,043	0,109
2015	0,749	0,033	0,095
2016	0,749	0,033	0,095

Nota: Os fatores de emissão são a média dos fatores de emissão para o combustível etanol.

**Tabela 09:** Fator de emissão para motocicletas movidas à gasolina (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	4,785	0,145	0,616
2002	4,785	0,145	0,616
2003	4,785	0,145	0,616
2004	6,065	0,175	0,693
2005	2,61	0,16	0,391
2006	2,235	0,175	0,285
2007	1,795	0,17	0,272
2008	1,355	0,115	0,196
2009	1,09	0,1	0,124
2010	0,684	0,065	0,131
2011	0,61	0,08	0,15
2012	0,5	0,07	0,128
2013	0,49	0,06	0,12
2014	0,49	0,06	0,12
2015	0,57	0,043	0,097
2016	0,57	0,043	0,097

**Tabela 10:** Fator de emissão para caminhões (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	1,36	6,329	0,344	0,409
2002	0,714	5,174	0,101	0,184
2003	0,714	5,174	0,101	0,184
2004	0,68	4,344	0,08	0,124
2005	0,68	4,344	0,08	0,124
2006	0,801	3,812	0,087	0,131
2007	0,801	3,812	0,087	0,131
2008	0,675	3,602	0,066	0,042
2009	0,673	3,632	0,062	0,03
2010	0,586	3,609	0,059	0,051
2011	0,638	3,539	0,06	0,039
2012	0,131	1,179	0,009	0,046
2013	0,12	1,13	0,011	0,046
2014	0,12	1,13	0,011	0,046
2015	0,137	1,165	0,011	0,045
2016	0,137	1,165	0,011	0,045

Nota: Os fatores de emissão são a média dos fatores de emissão dos caminhões semileves, leves, médios, semipesados e pesados.

**Tabela 11:** Fator de emissão para ônibus urbanos (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	2,816	13,105	0,712	0,911
2002	1,478	10,713	0,209	0,444
2003	1,478	10,713	0,209	0,444
2004	1,41	9	0,166	0,32
2005	1,41	9	0,166	0,32
2006	1,811	8,213	0,163	0,291
2007	1,811	8,213	0,163	0,291
2008	2,289	8,623	0,16	0,292
2009	1,895	8,262	0,147	0,234
2010	1,839	8,385	0,152	0,245
2011	1,677	8,464	0,152	0,148
2012	0,537	2,623	0,021	0,045
2013	0,539	2,686	0,021	0,045
2014	0,539	2,686	0,021	0,045
2015	0,479	2,623	0,023	0,042
2016	0,479	2,623	0,023	0,042

**Tabela 12:** Fator de emissão para micro-ônibus (CETESB, 2015).

Ano	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	MP (g/km)	NMHC (g/km)
<2002	2,477	11,526	0,626	0,814
2002	1,3	9,422	0,184	0,384
2003	1,3	9,422	0,184	0,384
2004	1,24	7,915	0,146	0,275
2005	1,24	7,915	0,146	0,275
2006	1,561	4,769	0,11	0,153
2007	1,561	4,769	0,11	0,153
2008	0,836	4,508	0,085	0,017
2009	0,761	4,742	0,081	0,01
2010	1,208	4,725	0,082	0,083
2011	1,177	4,871	0,094	0,075
2012	0,213	1,411	0,016	0,009
2013	0,132	1,221	0,011	0,029
2014	0,132	1,221	0,011	0,029
2015	0,106	1,478	0,01	0,034
2016	0,106	1,478	0,01	0,034

**Tabela 13:** Intensidade de uso (km/ano)

Anos de uso	Automóveis	Automóveis	Automóveis	Comerciais Leves	Comerciais Leves
	Gasolina	Etanol	Flex	Gasolina	Etanol
1	11997	11997	17220	17933	17933
2	12632	12632	15968	17638	17638
3	13177	13177	15277	17320	17320
4	13635	13635	15001	16981	16981
5	14009	14009	14995	16623	16623
6	13305	14305	15112	16248	16248
7	14525	18691	15208	15858	15848
8	14675	17456	15136	15456	15456
9	14758	16431	15000	15044	15044
10	14778	15596	15000	14624	14624
11	14739	14933	14836	14198	14198
12	14645	14421	14533	13768	13768
13	14500	14040	14270	13336	13336
14	14309	13771	14040	12905	12905
15	14075	13595	13835	12477	12477
> 16	9340	10693	10017	8917	8917

Anos de uso	Comerciais Leves	Comerciais Leves	Motocicletas	Motocicletas	Caminhões
	Flex	Diesel	Gasolina	Flex	Diesel
1	18220	28443	12807	12807	47139
2	21110	27358	13078	13078	44950
3	21914	26321	13243	13243	43009
4	21277	25270	13313	13313	41292
5	19843	24142	13293	13293	39777
6	18255	22874	13192	13192	38443
7	17160	21406	13019	13019	37268
8	17199	19673	12781	12781	36233
9	17500	17614	12486	12486	35321
10	17500	15950	12142	12142	34513
11	14198	15950	11758	11758	33794
12	13768	15950	11341	11341	33150
13	13336	15950	10900	10900	32565
14	12905	15950	10442	10442	32027
15	12477	15950	9976	9976	31526
> 16	8917	15950	9050	9050	25027

Continuação da tabela 13.

Anos de uso	Ônibus urbanos Diesel	Micro-ônibus Diesel
1	62470	35578
2	58979	31654
3	55908	29359
4	53205	27730
5	50816	26467
6	48689	25435
7	46769	24562
8	45004	23806
9	43341	23140
10	41727	22543
11	40108	22004
12	38432	21511
13	36644	21058
14	34693	20638
15	32525	18680
> 16	18671	18680

Continuação da tabela 13.

**APÊNDICE C - Avaliação do impacto da mudança dos fatores de emissão veicular na formação de ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Vela, 2013).**

**Tabela 01** - Testes estatísticos para temperatura durante o período de 12-15 de novembro de 2011.

	Parelheiros		Pinheiros		São Caetano do Sul		Taboão da Serra		MS-INMET		AF-IAG	
	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km
$\sigma_{obs}$	1,8	1,8	2,1	2,1	2,3	2,3	2,1	2,1	1,9	1,9	1,7	1,7
$\sigma_{sim}$	1,6	1,3	1,9	1,3	1,8	1,5	1,9	1,3	1,4	1,5	1,7	1,4
r	0,66	0,72	0,85	0,77	0,85	0,77	0,83	0,81	0,75	0,35	0,84	0,77
RMSE	1,5	1,4	1,1	1,4	1,3	1,5	1,3	1,4	1,3	2,1	1,0	1,2

**Tabela 02** - Testes estatísticos para umidade relativa durante o período de 12-15 de novembro de 2011.

	Parelheiros		São Caetano do Sul		Taboão da Serra		MS-INMET		AF-IAG	
	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km
$\sigma_{obs}$	4,5	4,5	9,8	9,8	11,8	11,8	12,0	12,0	7,4	7,4
$\sigma_{sim}$	3,3	1,3	5,5	4,3	8,3	6,5	9,8	7,2	6,7	4,6
R	0,35	0,18	0,27	-0,19	0,70	0,69	0,74	0,59	0,62	0,34
RMSE	4,6	4,6	9,8	11,4	8,3	8,6	8,7	10,1	6,2	7,3

**Tabela 03** - Testes estatísticos para óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) durante o período de 12-15 de novembro de 2011.

	Cerqueira Cesar		Congonhas		Tirapuera		IPEN-USP		Mauá		Parelheiros	
	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km
$\sigma_{obs}$	30,7	30,7	30,1	30,1	8,2	8,2	7,8	7,8	10,8	10,8	23,5	23,5
$\sigma_{sim}$	8,1	7,0	8,0	4,6	7,7	5,0	7,6	5,2	7,0	1,9	5,0	1,3
r	0,53	0,30	0,05	0,34	0,58	0,28	0,52	0,22	0,26	0,05	0,50	0,12
RMSE	32,5	35,1	63,1	67,0	7,3	9,9	7,5	9,1	11,4	15,4	24,7	29,5

	Parque Don Pedro II		Pinheiros		Taboão da Serra	
	3 km	1 km	3 km	1 km	3 km	1 km
$\sigma_{obs}$	17,4	17,4	21,5	21,5	19,2	19,2
$\sigma_{sim}$	7,4	7,3	8,0	4,8	7,4	3,2
R	0,48	0,19	0,38	0,21	0,46	0,28
RMSE	21,2	24,5	24,5	28,0	23,4	29,3
D	0,54	0,47	0,49	0,43	0,49	0,42

Continuação da tabela 03.

**APÊNDICE D - Condições meteorológicas e níveis de poluição na Região Metropolitana de Lima – Perú (Rojas, 2013).**

**Nome das estações de medições:** CM – Campo de Marte, SA – Santa Anita, PL – Ponta Lobos, AN – Ancon, VH – Von Humbolt, SB – San Borja, VM – Villa Maria del Triunfo, AA – Agua Azul, AE – Aeropuerto, HC – Hospital Central FAP, AT – Ate.

**Tabela 01** - Testes estatísticos para a temperatura durante o período de 22-28 de janeiro de 2012.

<b>Estação</b>	<b>EM</b>	<b>RMSE</b>	<b>R</b>	$\sigma_o$	$\sigma_s$
CM	0,92	1,41	0,76	1,62	1,43
SA	-1,36	1,97	0,84	2,61	2,09
SP	-0,01	1,87	0,63	2,10	2,16
PL	-0,41	0,92	0,43	0,90	0,48
AZ	1,31	2,20	0,87	3,12	1,82
AN	-0,26	1,42	0,55	1,67	1,00
VH	2,85	3,72	0,84	3,52	1,55
SB	1,04	1,79	0,77	2,17	1,22
VM	0,85	2,23	0,72	2,62	0,94

**Tabela 02** - Testes estatísticos para a umidade relativa durante o período de 22-28 de janeiro de 2012.

<b>Estação</b>	<b>EM</b>	<b>REMQ</b>	<b>R</b>	$\sigma_o$	$\sigma_s$
CM	3,34	9,12	0,56	8,71	9,35
SA	0,21	9,51	0,62	11,78	9,61
SP	-3,68	8,82	0,57	9,34	7,63
PL	-2,79	5,08	0,41	4,34	3,33
AZ	-8,67	14,41	0,61	14,34	10,87
AN	1,28	10,34	-0,01	8,84	5,07
VH	-18,14	21,56	0,68	15,70	9,03
SB	4,41	9,71	0,54	8,25	9,61
VM	-2,44	10,16	0,49	11,16	6,90

**Tabela 03** - Testes estatísticos para a temperatura durante o período de 05-11 de julho de 2012.

Estação	EM	RMSE	R	$\sigma_o$	$\sigma_s$
SA	-0,16	1,39	0,88	1,31	2,39
PL	-0,10	0,89	0,65	0,65	1,14
AZ	0,05	1,50	0,73	1,57	2,17
HP	1,11	1,48	0,87	1,03	1,73
VH	-0,16	1,48	0,88	1,53	2,62

**Tabela 04** - Testes estatísticos para a umidade relativa durante o período de 05-11 de julho de 2012.

Estação	EM	RMSE	R	$\sigma_o$	$\sigma_s$
SA	-3,15	8,01	0,78	7,56	11,48
PL	-4,31	7,90	0,28	5,15	5,81
AZ	1,57	9,15	0,60	9,36	10,51
HP	-5,19	7,25	0,81	7,19	8,55
VH	-3,26	9,56	0,75	7,67	13,05

**APÊNDICE E - Air quality modelling in the Berlin-Brandenburg region using WRF-Chem v3.7.1: sensitivity to resolution of model grid and input data (Kuik et al., 2016).**

**Significado das abreviaturas:** LU – classe de uso do solo; Obs – média do observado; Mod – média das simulações; MB – erro médio; r – coeficiente de correlação;

**Simulações com o WRF/CHEM:** Base - utilização das configurações padrões do WRF/CHEM; S1\_urb - representação atualizada dos dados de cobertura de solo e de outros parâmetros urbanos para a região de Berlim onde se atribuiu a categoria de uso de solo mais abundante dentro de uma célula de grade a toda célula respectiva; S2\_mos - consideração da heterogeneidade das categorias de uso do solo dentro de uma célula de grade do modelo (abordagem mosaica); S3\_emi - fazendo um aumento da resolução horizontal de 7 km do inventário de emissão para uma resolução mais fina de 1 km; d01 – 15 km x 15 km; d02 – 3 km x 3 km; d03 – 1 km x 1 km.

**Tabela 01** - Análise estatística das concentrações de NO<sub>x</sub> simuladas.

Station		Obs	Base			S1_urb			S2_mos			S3_emi		
			Mod	MB	r	Mod	MB	r	Mod	MB	r	Mod	MB	r
froh	d01	8.3	20.2	11.9	0.56	22	13.7	0.43	26	17.7	0.55	18.4	10.1	0.45
	d02	8.3	10.3	2	0.55	10.6	2.3	0.48	11.4	3.1	0.55	8.4	0.1	0.5
	d03	8.3	10.1	1.8	0.56	10.7	2.4	0.49	10.7	2.4	0.56	8.2	-0.1	0.49
grun	d01	9.1	12.4	3.3	0.46	13.1	4	0.46	16.4	7.3	0.49	9.3	0.2	0.42
	d02	9.1	16.1	7	0.3	16.7	7.6	0.38	18.4	9.3	0.39	12.8	3.7	0.42
	d03	9.1	15.8	6.7	0.27	16.5	7.3	0.37	18.7	9.6	0.33	11.6	2.5	0.31
mueg	d01	9.1	14	4.9	0.42	15.4	6.2	0.36	17.7	8.6	0.49	12.1	3	0.37
	d02	9.1	14.4	5.3	0.4	16.2	7.1	0.36	16.7	7.5	0.5	13.2	4.1	0.33
	d03	9.1	13.5	4.3	0.45	14.7	5.5	0.38	15.3	6.2	0.52	12.1	3	0.37
schw	d01	11.7	21.8	10.1	0.41	23.3	11.6	0.34	27.4	15.7	0.49	20.5	8.8	0.31
	d02	11.7	14.2	2.5	0.36	15.2	3.5	0.36	16.3	4.6	0.48	10.5	-1.3	0.2
	d03	11.7	14	2.3	0.39	15.4	3.6	0.38	16	4.3	0.47	11.3	-0.4	0.18
blan	d01	11.9	10.8	-1.1	0.26	10.7	-1.2	0.2	10.8	-1	0.24	9.6	-2.2	0.17
	d02	11.9	12.8	0.9	0.22	13.7	1.8	0.21	14.8	2.9	0.31	10.4	-1.5	0.17
	d03	11.9	11.2	-0.6	0.26	11.7	-0.2	0.18	12.5	0.7	0.29	9.1	-2.7	0.16
buch	d01	11	20.2	9.3	0.62	22	11	0.54	26	15	0.57	18.4	7.4	0.54
	d02	11	11.1	0.1	0.7	12.4	1.4	0.65	12.9	2	0.68	9.6	-1.4	0.66
	d03	11	10.3	-0.7	0.7	12.2	1.2	0.62	12.2	1.2	0.67	9	-2	0.64
glie	d01	8.7	12.4	3.7	0.44	13	4.4	0.48	16.3	7.7	0.38	9.2	0.6	0.44
	d02	8.7	15.4	6.7	0.5	15.4	6.7	0.52	17.8	9.1	0.43	8.9	0.2	0.53
	d03	8.7	13.4	4.8	0.49	13.6	4.9	0.51	15.7	7	0.42	8.6	0	0.57
amst	d01	26.6	20.2	-6.3	0.67	22	-4.6	0.62	26	-0.6	0.68	18.4	-8.2	0.63
	d02	26.6	24.9	-1.7	0.64	27.3	0.8	0.6	29.9	3.3	0.63	26.9	0.3	0.6
	d03	26.6	23.5	-3	0.61	26.5	-0.1	0.59	29.5	3	0.59	29	2.4	0.58
belz	d01	23.4	21.8	-1.6	0.49	23.3	-0.1	0.4	27.4	4	0.52	20.5	-2.9	0.46
	d02	23.4	22.2	-1.2	0.45	24	0.5	0.4	25.9	2.5	0.48	20.3	-3.1	0.3
	d03	23.4	20.9	-2.6	0.45	22.5	-0.9	0.46	24.9	1.5	0.53	19.7	-3.7	0.31
brue	d01	28.5	21.8	-6.7	0.44	23.3	-5.2	0.35	27.4	-1.1	0.45	20.5	-8	0.41
	d02	28.5	26.3	-2.2	0.56	29	0.4	0.49	29.2	0.7	0.56	30	1.5	0.49
	d03	28.5	24.4	-4.1	0.56	27.1	-1.4	0.52	28.3	-0.3	0.56	54.2	25.7	0.48
nans	d01	25.3	21.8	-3.5	0.46	23.3	-2	0.42	27.4	2.1	0.51	20.5	-4.8	0.47
	d02	25.3	26.3	1.1	0.54	29	3.7	0.52	29.2	3.9	0.6	30	4.7	0.5
	d03	25.3	23.1	-2.2	0.51	25.6	0.4	0.5	26.9	1.6	0.58	23.2	-2.1	0.38
pots	d01	15.7	12.4	-3.4	0.44	13	-2.7	0.33	16.3	0.6	0.35	9.2	-6.5	0.31
	d02	15.7	10	-5.7	0.42	10.1	-5.6	0.3	11.3	-4.4	0.37	8.6	-7.1	0.36
	d03	15.7	9.1	-6.7	0.4	9.3	-6.4	0.3	10	-5.7	0.35	7.9	-7.9	0.36

Tabela 02 - Análise estatística para a temperatura simulada a 2 m.

Station		LU	Obs	Base			S1_urb			S2_mos		
				Mod	MB	r	Mod	MB	r	Mod	MB	r
kani	d01	31	18.1	19.6	1.5	0.88	19.3	1.2	0.88	19.2	1	0.89
	d02	2	18.1	19.4	1.3	0.9	19.3	1.2	0.9	19.3	1.1	0.89
	d03	2	18.1	19.4	1.2	0.9	19.2	1.1	0.9	19.2	1.1	0.89
marz	d01	2	19.2	18.8	-0.4	0.91	18.7	-0.6	0.9	18.9	-0.4	0.92
	d02	31	19.2	19.6	0.4	0.91	19.4	0.2	0.9	19.2	0	0.9
	d03	31	19.2	19.7	0.4	0.91	19.3	0.1	0.9	19.2	0	0.9
scho	d01	31	18.8	19.6	0.8	0.92	19.3	0.6	0.91	19.2	0.4	0.92
	d02	31	18.8	19.9	1.1	0.91	19.7	0.9	0.91	19.4	0.6	0.91
	d03	2	18.8	19.3	0.6	0.92	19.2	0.4	0.91	19.3	0.6	0.91
temp	d01	31	19.3	19.6	0.3	0.92	19.3	0	0.91	19.3	-0.1	0.92
	d02	33	19.3	20.3	0.9	0.9	19.7	0.4	0.9	19.6	0.3	0.9
	d03	33	19.3	20.2	0.8	0.9	19.6	0.3	0.9	19.5	0.2	0.9
nans	d01	31	20.8	19.6	-1.1	0.91	19.3	-1.4	0.9	19.3	-1.5	0.91
	d02	31	20.8	19.9	-0.9	0.9	19.6	-1.1	0.89	19.6	-1.2	0.9
	d03	32	20.8	20.2	-0.5	0.9	20	-0.8	0.89	19.6	-1.2	0.9
dahf	d01	31	17.9	19.6	1.6	0.88	19.3	1.4	0.89	19.1	1.1	0.9
	d02	14	17.9	19.3	1.4	0.9	19.1	1.2	0.9	19.3	1.4	0.88
	d03	14	17.9	19.2	1.3	0.9	19	1.1	0.9	19.2	1.3	0.88
bamb	d01	31	19.3	19.6	0.4	0.9	19.3	0.1	0.89	19.3	0	0.91
	d02	31	19.3	19.9	0.6	0.89	19.6	0.4	0.88	19.6	0.3	0.9
	d03	32	19.3	20.2	0.9	0.9	19.9	0.7	0.89	19.5	0.2	0.9

Figura 01 – Rosa dos ventos.

